



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΝΕΛ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων: ΜΟΛΑΣΙΩΤΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ/ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ/2022

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING

LIFE CYCLE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC PANEL

Subtitle

THESIS

NIKOLAIDIS NIKOLAOS

SUPERVISOR: VASILIOS MOLASIOTIS

KOZANI/SEPTEMBER/2022

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περίληψη

Η βιομηχανική επανάσταση, η πρόοδος των επιστημών και ιδιαίτερα της ιατρικής, καθώς και η διαρκής βελτίωση των συνθηκών ζωής του σύγχρονου ανθρώπου, έχουν οδηγήσει σε μία σημαντική αύξηση του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο. Ο πληθυσμός της γης, ο οποίος το 1960 ανέβηκε για πρώτη φορά πάνω από τα 3 δισεκατομμύρια, αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς, ιδιαίτερα μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο όπου, περίπου κάθε 12 με 15 χρόνια, ο πληθυσμός της γης μεγαλώνει κατά ένα δισεκατομμύριο. Με τον πληθυσμό της γης να έχει φτάσει στα 7,5 δισεκατομμύρια το 2017 και να αναμένεται ότι θα ανέβει στα 10 δισεκατομμύρια το 2050, οι ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη και ιδιαίτερα η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, δημιουργεί μία ιδιαίτερη κατάσταση σχετικά με την ικανότητα της επέκτασης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με έναν τρόπο πάντως φιλικό προς το περιβάλλον. Μία αξιόλογη τεχνολογία που μπορεί να βοηθήσει σημαντικά προς αυτή την κατεύθυνση είναι η φωτοβολταϊκή ενέργεια. Η συγκεκριμένη τεχνολογία βέβαια συνδέεται με την επεξεργασία και την χρήση εξοπλισμού που σχετίζεται με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στην παρούσα εργασία λοιπόν θα διερευνηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών μέσω της ανάλυσης του κύκλου ζωής.

Λέξεις κλειδιά: Φωτοβολταϊκό, ανάλυση κύκλου ζωής, ηλεκτρική ενέργεια.

Abstract

The industrial revolution, the progress of the sciences and especially medicine, as well as the continuous improvement of the living conditions of modern man, have led to a significant increase in the population worldwide. The world's population, which in 1960 rose for the first time to more than 3 billion, is growing at a rapid rate, especially after the second world war where, about every 12 to 15 years, the world's population grows by a billion. With the earth's population reaching 7.5 billion in 2017 and expected to rise to 10 billion in 2050, the planet's energy needs, and especially electricity consumption, creates a special situation regarding the ability to expand electricity generation, in an environmentally friendly way. A remarkable technology that can significantly help in this direction is photovoltaic energy. This particular technology is of course linked to the processing and use of equipment related to significant environmental impacts. In this paper, the environmental effects of the materials used for the construction of photovoltaics will be investigated through life cycle assessment.

Keywords: Photovoltaic, life cycle assessment, electricity.

ΚΟΖΑΝΗ/ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ/2022

ΑΥΤΗ Η ΣΕΛΙΔΑ ΕΙΝΑΙ ΣΚΟΠΙΜΑ ΛΕΥΚΗ

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος σχημάτων	10
Κατάλογος εικόνων	11
Κατάλογος πινάκων	12
Πρόλογος	13
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	15
Κεφάλαιο 2. Η τεχνολογία του φωτοβολταϊκού	21
Κεφάλαιο 3. Η ιστορία του ηλιακού πάνελ	29
Κεφάλαιο 4. Είδη ηλιακής κυψέλης	33
Κεφάλαιο 5. Μέθοδος παραγωγής πυριτίου	35
Κεφάλαιο 6. Δείκτες μέτρησης ηλιακής ενέργειας	28
Κεφάλαιο 7. Εκπομπές αερίων στον κλάδο των φωτοβολταϊκών	39
Κεφάλαιο 8. Ανάλυση κύκλου ζωής φωτοβολταϊκών	42
8. 1 Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς	42
8. 2 Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς	49
8. 3 Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς	54
Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα-Συζήτηση	63
Βιβλιογραφία	67

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1. 1 23

Σχήμα 1. 2 23

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2. 1	25
Εικόνα 2. 2	27

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. 1	18
Πίνακας 2. 1	29
Πίνακας 2. 2	30
Πίνακας 2. 3	31

Πρόλογος

Το ζήτημα της προστασίας του περιβάλλοντος είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που απασχολεί τις σύγχρονες κοινωνίες. Το ζήτημα της προστασίας του περιβάλλοντος συνδέεται στενά και με το ενεργειακό ζήτημα. Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο ο πληθυσμός της γης αυξάνεται συνεχώς. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των ειδικών ο πληθυσμός της γης ενδέχεται να αγγίξει τον αριθμό των 10 δισεκατομμυρίων ανθρώπων περίπου το 2050 (Fukurozaki et al., 2013).

Η αύξηση αυτή του πληθυσμού δημιουργεί από μόνη της μία αύξηση στη ζήτηση της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας αναγκαία τη διερεύνηση μεθόδων που θα επιτρέψουν την αύξηση της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Με τα σημερινά δεδομένα, πάνω από το 80% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο καλύπτεται από την αξιοποίηση μιας σειράς ορυκτών καυσίμων. Η αξιοποίηση όμως του άνθρακα, του φυσικού αερίου, του πετρελαίου κτλ., συμβάλλει σε διάφορα αρνητικά φαινόμενα που ρυπαίνουν το περιβάλλον και υποβαθμίζουν την ποιότητα του. Τα ορυκτά καύσιμα οφείλονται σε μεγάλο βαθμό για την εμφάνιση του φαινομένου της αιθαλομίχλης ειδικά στα μεγάλα αστικά κέντρα, για τη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής και για την υπερθέρμανση του πλανήτη μεταξύ άλλων (Kim et al., 2014).

Ανησυχίες επίσης προκαλούν σχετικά με το μέλλον της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα οι κρίσεις που συνδέονται με την εφοδιαστική αλυσίδα τους, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα ενδέχεται να δημιουργήσει τεράστια προβλήματα μελλοντικά, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα κοιτάσματα των ορυκτών καυσίμων θα εξαντληθούν. Η φωτοβολταϊκή ενέργεια αποτελεί μία λύση που παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, τόσο γιατί αποτελεί μία λύση βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον, αλλά και γιατί η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας αποτελεί μία λύση που προσανατολίζεται σε μία απεριόριστη πηγή ενέργειας, η οποία είναι από τη φύση της μη ρυπογόνος, είναι άμεσα διαθέσιμη σε όλα τα μήκη και πλάτη της γης, ενώ μπορεί να αξιοποιηθεί και σε περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα λόγω της γεωγραφικής τους θέσης όπως για παράδειγμα απομονωμένες και απομακρυσμένες περιοχές (Stylos, 2014).

Έτσι λοιπόν οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες που συνεχώς θα μεγαλώνουν, αλλά και το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων παραγωγής ενέργειας, έχουν επικεντρώσει το ενδιαφέρον στην ανάπτυξη τεχνολογίας που σχετίζεται με

εναλλακτικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η φωτοβολταϊκή ενέργεια. Η τεχνολογία της φωτοβολταϊκής ενέργειας έχει χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν σε μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, οι οποίες αρχικά σχετίστηκαν με αρκετά προηγμένες τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα η παροχή ενέργειας σε διαστημικές ακάτους. Τα τελευταία χρόνια όμως οι εφαρμογές αυτές έχουν επεκταθεί για να συμπεριλάβουν συστήματα τα οποία απευθύνονται σε χερσαίες εφαρμογές οι οποίες εξυπηρετούν ενεργειακούς στόχους που κυμαίνονται από την εξυπηρέτηση φορητών συσκευών μέχρι οικιακές εφαρμογές (Yang et al., 2015).

Ένα σημαντικό εμπόδιο για μία συστηματική αξιοποίηση εφαρμογών φωτοβολταϊκής τεχνολογίας σε παγκόσμια κλίμακα αποτελεί το γεγονός ότι η κατασκευή ενός ηλιακού συλλέκτη απαιτεί την επεξεργασία ενεργοβόρων και ως επί το πλείστον ακριβών υλικών, ενώ παράλληλα, διάφορα υλικά από αυτά σχετίζονται με τη δυνατότητα σοβαρής περιβαλλοντικής επίπτωσης. Έτσι λοιπόν η ταυτόχρονη ανάγκη για διερεύνηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας αλλά και το αυξημένο ενδιαφέρον για την προστασία του περιβάλλοντος, ώθησαν την μελέτη και την ανάπτυξη Συστημάτων Περιβαλλοντικής Διαχείρισης. Μία από τις μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας διαδικασίας ή μιας υπηρεσίας είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Fu et al., 2015).

Πρόκειται για μία επιστημονική μέθοδο η οποία συνίσταται στη συστηματική διερεύνηση των διεργασιών μίας διαδικασίας σε σχέση με την εισροή και την εκροή ενέργειας σε όλα τα στάδια της διεργασίας. Σκοπός της διερεύνησης είναι αρχικά η αξιολόγηση και ο προσδιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας διαδικασίας, ενώ στη συνέχεια η αξιοποίηση των πορισμάτων της διερεύνησης προκειμένου να αναζητηθούν οι πρακτικές που θα οδηγήσουν στη μείωση κάθε ενδεχόμενης αρνητικής επίπτωσης της διαδικασίας. Η διαδικασία αποτελείται τυπικά από τέσσερα στάδια στα οποία γίνεται μία γενικότερη εκτίμηση για το αντικείμενο της έρευνας και το σκοπό, καταγράφονται τα δεδομένα που προκύπτουν από την έρευνα του κύκλου ζωής, εκτιμώνται οι επιπτώσεις του κύκλου ζωής και τέλος γίνεται μία καθολική διερεύνηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της έρευνας (Hong et al., 2016).

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η αγορά ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει αναπτυχθεί έντονα τα τελευταία χρόνια. Με βάση τα τελευταία δημοσιευμένα δεδομένα, 102,4 GW φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένων στο δίκτυο εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως το 2018 και αυτή η τιμή αντιστοιχεί στη συνολική διαθέσιμη ισχύ φωτοβολταϊκών στον κόσμο το 2012 (100,9 GW). Αυτό το αποτέλεσμα οδηγεί σε συνολική παγκόσμια ισχύ ηλιακής ενέργειας άνω των 500 GW το 2018 (η εγκατεστημένη ηλιακή παγκόσμια ισχύς είχε φτάσει τα 400 GW το 2017). Η κύρια συνεισφορά δίνεται από την Κίνα, τις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ινδία και την Ιαπωνία. Με εξαίρεση τις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου η εγκατεστημένη νέα ηλιακή ισχύς ήταν σταθερή (10,6% το 2017 και το 2018), οι άλλοι κύριοι συνεισφέροντες εγκατέστησαν λιγότερο από το προηγούμενο έτος: Κίνα 44 GW (16% λιγότερο από το 2017), Ινδία 8,3 GW (16% λιγότερο από το 2017) και την Ιαπωνία 6,6 GW (8% λιγότερο από το 2017). Η Αυστραλία ήταν η πέμπτη μεγαλύτερη αγορά στον κόσμο το 2018, προσθέτοντας 5,3 GW, έως και 295% περισσότερο από το 2017 (Rao et al., 2022).

Ενδεικτικά παρατίθεται πίνακας με τις χώρες που εμφανίζουν την υψηλότερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της χρήσης φωτοβολταϊκών

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 1 Παγκόσμια παραγωγή ρεύματος με φωτοβολταϊκά το 2021

Θέση	Χώρα	Ποσοστό επί της παγκόσμιας παραγωγής
01	Κίνα	35,8%
02	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής	11,1%
03	Ιαπωνία	8,7%
04	Γερμανία	6,8%
05	Ινδία	6,6%
06	Ιταλία	2,6%
07	Αυστραλία	2,2%
08	Νότιος Κορέα	2,1%
09	Βιετνάμ	1,9%

10	Ισπανία	1,9%
11	Γαλλία	1,7%
12	Ολλανδία	1,7%
13	Ηνωμένο Βασίλειο	1,6%
14	Βραζιλία	1,5%
15	Όλες οι υπόλοιπες χώρες	13,6%

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) ανέλαβε τον ηγετικό ρόλο στην επίτευξη των τελικών στόχων της υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, της μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) και άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω της χρήσης τους. Για το λόγο αυτό, σύμφωνα με τον νέο στόχο του 32% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το 2030, η ΕΕ στοχεύει να επεκτείνει τη διανομή της ηλιακής τεχνολογίας τα επόμενα χρόνια (το 2018, η συνολική ισχύς που εγκαταστάθηκε στην Ευρώπη ήταν 11,3% GW, 21% μεγαλύτερη από την ισχύ εγκαταστάθηκε το 2017). Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα στον ευρωπαϊκό χώρο, η ΕΕ παρουσίασε μια σημαντική τάση: 22 από τις 28 αγορές της ΕΕ παρουσίασαν αύξηση στον αριθμό των εγκαταστάσεων σε σύγκριση με το 2017 και συνολική αύξηση 8,2 GW ηλιακής ισχύος συνδεδεμένης στο δίκτυο (37% περισσότερο από το 2017). Καταβλήθηκε μεγάλη προσπάθεια για τη βελτίωση των επιδόσεων των φωτοβολταϊκών, και στον περιβαλλοντικό τομέα. Επομένως, η τεχνολογία φωτοβολταϊκών είναι φιλική προς το περιβάλλον σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα για πολλές κατηγορίες επιπτώσεων, αλλά δεν μπορεί να θεωρηθεί εντελώς απαλλαγμένη από περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της. Επομένως, η αξιολόγηση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων από τη χρήση φωτοβολταϊκών πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τους κύκλους ζωής αυτών των συστημάτων. Μια καλή τυποποιημένη μέθοδος για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η ανάλυση του κύκλου ζωής, η οποία λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες και μη, την εξάντληση των πόρων και τις εκπομπές κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής μιας τεχνολογίας (Blanco et al., 2020).

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) προέκυψε από την ανάγκη συσχέτισης μιας μεθοδολογίας που διευκόλυνε την ανάλυση και τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις δραστηριότητες μιας εταιρείας, συμπεριλαμβανομένων των προϊόντων και των διαδικασιών της. Από μια μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής, μπορεί να προκύψει ο τρόπος με τον οποίο

η πρόληψη της ρύπανσης γίνεται πιο ορθολογική, οικονομική και αποτελεσματική από την ανάλυση μιας δράσης για τα παραγόμενα αποτελέσματα. Ένας από τους στόχους της AKZ είναι να δημιουργήσει ένα αξιόπιστο σύστημα που να μπορεί να αναπαραχθεί, ώστε να καθίσταται δυνατή η λήψη αποφάσεων με στόχο τη χαμηλότερη πιθανή περιβαλλοντική επίπτωση. Τα πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006, ορίζουν την ανάλυση κύκλου ζωής ως μια τεχνική για την αξιολόγηση περιβαλλοντικών πτυχών, καθώς και των πιθανών επιπτώσεων που σχετίζονται με ένα προϊόν, που περιλαμβάνει βήματα που κυμαίνονται από την απομάκρυνση των πρώτων υλών από τη φύση, που εισέρχονται στο παραγωγικό σύστημα, μέσω της αξιολόγησης καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, στη διάθεση του προϊόντος, μετά την κατανάλωση (Huang et al., 2017).

Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής: Ο στόχος μιας μελέτης AKZ πρέπει να αναφέρει ξεκάθαρα την προβλεπόμενη εφαρμογή, τους λόγους διεξαγωγής της μελέτης, το πεδίο μιας μελέτης AKZ πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη λειτουργία του συστήματος προϊόντος, τη λειτουργική μονάδα, τις ροές αναφοράς, τα όρια του συστήματος, τις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τους περιορισμούς της μελέτης. Η λειτουργική μονάδα είναι αυτή που περιγράφει ποσοτικά την υπηρεσία που παρέχεται από το σύστημα προϊόντων που μελετήθηκε και χρησιμεύει ως αναφορά για όλες τις εισόδους και εξόδους του συστήματος. Η ροή αναφοράς μπορεί να περιγραφεί ως το μέτρο των εκροών διεργασίας σε ένα δεδομένο σύστημα προϊόντος που απαιτείται για την εκτέλεση της λειτουργίας που εκφράζεται από τη λειτουργική μονάδα. Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποια μέρη του κύκλου ζωής και ποιες διεργασίες ανήκουν στο αναλυόμενο σύστημα. Ένας ακριβής ορισμός των ορίων του συστήματος είναι σημαντικός για να διασφαλιστεί ότι όλες οι σχετικές διαδικασίες περιλαμβάνονται στο μοντελοποιημένο σύστημα και ότι καλύπτονται όλες οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Akinyele, 2017).

Ανάλυση Αποθέματος Κύκλου Ζωής: Περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων και τις διαδικασίες υπολογισμού για την ποσοτικοποίηση των σχετικών εισροών και εκροών ενός συστήματος προϊόντων. Καθώς συλλέγονται δεδομένα και γίνονται γνωστά περισσότερα για το σύστημα, ενδέχεται να εντοπιστούν νέες απαιτήσεις ή περιορισμοί για τα δεδομένα που απαιτούν αλλαγή στις διαδικασίες συλλογής δεδομένων, οδηγώντας σε ζητήματα που απαιτούν αναθεωρήσεις του σκοπού ή του πεδίου της μελέτης (Hou et al., 2016).

Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής: Γενικά, αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη συσχέτιση δεδομένων αποθέματος με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την προσπάθεια κατανόησης αυτών των επιπτώσεων, μπορεί να υπάρξει συσχέτιση των δεδομένων αποθέματος ανά κατηγορίες επιπτώσεων, απογραφή μοντελοποίησης δεδομένων και πιθανή

συγκέντρωση αποτελεσμάτων. Οι επιπτώσεις που αξιολογούνται συνήθως περιλαμβάνουν: την κλιματική αλλαγή, την καταστροφή του στρώματος του όζοντος, την οξίνιση, τη χρήση γης, τη σπανιότητα των πόρων και την ανθρώπινη τοξικότητα (Latunussa et al., 2016).

Ερμηνεία Κύκλου Ζωής: Αυτή είναι η φάση AKZ κατά την οποία τα ευρήματα της ανάλυσης απογραφής και της εκτίμησης επιπτώσεων συνδυάζονται με συνέπεια, με τον καθορισμένο στόχο και πεδίο εφαρμογής, προκειμένου να καταλήξουν σε συμπεράσματα.

Αναφορά: Τα αποτελέσματα, τα δεδομένα, οι μέθοδοι, οι υποθέσεις και οι περιορισμοί θα πρέπει να είναι διαφανή και να παρουσιάζονται με επαρκή λεπτομέρεια ώστε να επιτρέπουν στον αναγνώστη να κατανοήσει τις πολυπλοκότητες και τους συμβιβασμούς που είναι εγγενείς στη μελέτη της AKZ. Η έκθεση είναι το τελικό έγγραφο της AKZ. Το επίπεδο λεπτομέρειας εξαρτάται από ορισμένες κύριες πτυχές όπως: τον σκοπό και την εφαρμογή της μελέτης, καθώς και το κοινό-στόχο. Η κριτική ανασκόπηση θα πρέπει να διενεργείται από επαγγελματίες που δεν συμμετείχαν στην εκτέλεση της μελέτης (Fu et al., 2015).

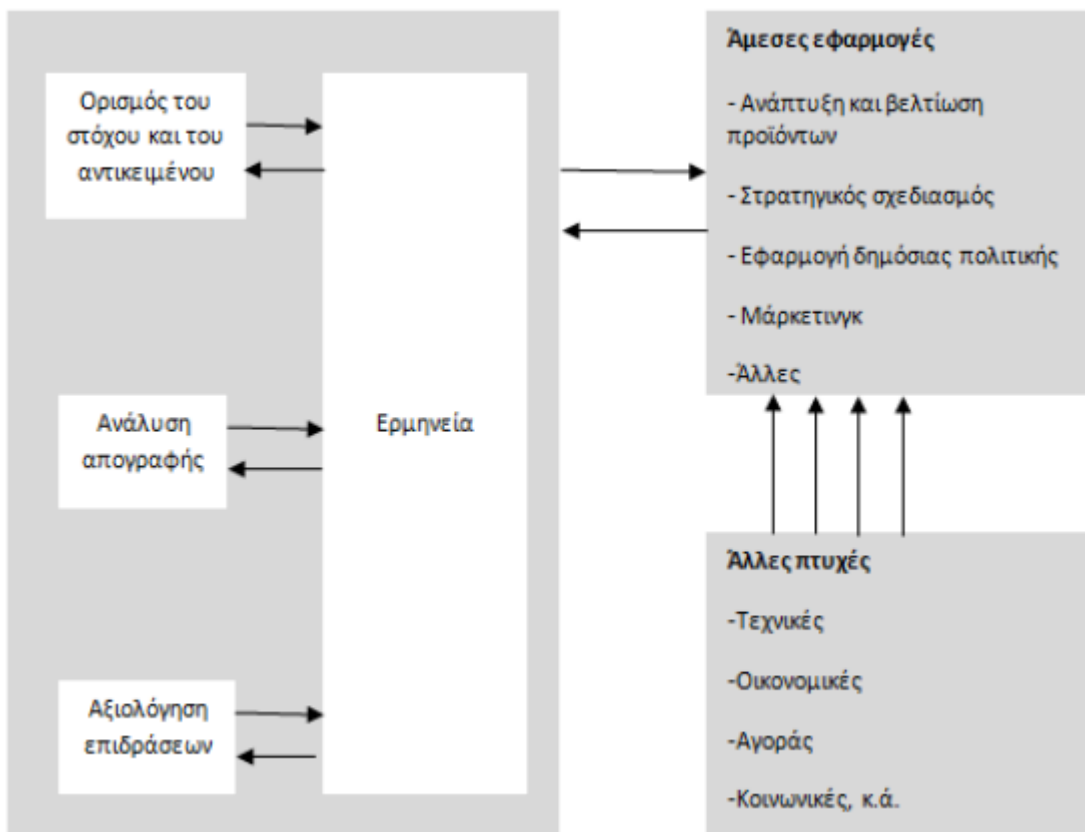
Παρατηρώντας τα βήματα της ανάλυσης κύκλου ζωής, είναι σαφές ότι πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία απαιτούνται επαναλήψεις για να ληφθούν πιο συνεπή αποτελέσματα, καθώς και μεγαλύτερη αξιοπιστία των δεδομένων που συλλέγονται. Η AKZ περιλαμβάνει βήματα που κυμαίνονται από την εξόρυξη πρώτης ύλης, τη σύλληψη σχεδιασμού, την κατασκευή, τη συναρμολόγηση και το τέλος ζωής του εξοπλισμού, και στη συνέχεια υπολογίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εξαρτημάτων, τα οποία είναι: ορυκτών πόρων, υδάτινων πόρων, καθώς και η καταστροφή του όζοντος, η χρήση γης, η οξίνιση, η κλιματική αλλαγή και η επικίνδυνη για τον άνθρωπο τοξικότητα. Αυτή η μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικούς τομείς δραστηριότητας, ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή ενέργειας έχει γίνει ένα από τα σημαντικότερα πεδία εφαρμογής της AKZ (Yang et al., 2015).

Η ανάλυση του κύκλου ζωής προωθεί μία σειρά από φιλικές προς το περιβάλλον αντιλήψεις. Ο άνθρωπος μπορεί να αντιληφθεί ότι μία σειρά από καθημερινές φαινομενικά ατομικές επιλογές συνδέονται, δημιουργώντας στο σύνολό τους ένα τεράστιο πρόβλημα στο γενικότερο σύστημα γύρω του. Κάθε χρόνο χάνονται για διάφορους λόγους πάνω από 8 δισεκατομμύρια δέντρα. Αν υποθεθεί ότι έχουν ύψος μόνο 3 μέτρα και τοποθετηθούν το ένα πάνω στο άλλο, φτάνουν να καλύψουν μία απόσταση που αντιστοιχεί σχεδόν 12 φορές την απόσταση μεταξύ γης και σελήνης. Αυτή και παρόμοιου είδους γνώσεις θα μπορούσαν να δημιουργήσουν την πρόθεση να αξιοποιεί κανείς ανακυκλωμένο ξύλο και χαρτί για παράδειγμα. Μέσω της ανάλυσης του κύκλου ζωής εκτιμάται σε

ρεαλιστική βάση η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα σε επιλογές που γίνονται με βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα κριτήρια. Η ανάλυση του κύκλου ζωής φωτίζει κάθε πτυχή περιβαλλοντικής επίπτωσης, επιτρέποντας ολιστικές λύσεις και όχι λύσεις οι οποίες για να αποφύγουν κάποιο πρόβλημα δημιουργούν κάποιο άλλο. Τέλος η ανάλυση του κύκλου ζωής επιτρέπει, ακόμα και στην περίπτωση που οι διαθέσιμες επιλογές δεν είναι ιδανικές, να γίνονται με ασφαλή γνώση των δεδομένων, αφού στο πλαίσιο λήψης των αποφάσεων μπαίνουν όλα τα δεδομένα που αφορούν τις πτυχές του συστήματος και του κύκλου ζωής (Blanco, 2020).

Πρόκειται άλλωστε για μία διαδικασία η αναγκαιότητα της οποίας προκύπτει από την εξέλιξη των επενδύσεων που πραγματοποιούνται στο χώρο των φωτοβολταϊκών σε παγκόσμιο επίπεδο. Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί ότι η Κίνα, η χώρα που ηγείται επί του παρόντος στις επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επένδυσε περισσότερα από 7,1 τρισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ στον τομέα των φωτοβολταϊκών από το 2005 έως το 2015. Αυτός ο όγκος επενδύσεων, εκτός από την εγγύηση εγκατεστημένης ισχύος που είναι πολύ υψηλότερη από αυτή άλλων χωρών, προώθησε επίσης τη μείωση του κόστους παραγωγής την τελευταία δεκαετία. Αυτό το γεγονός ήταν ένας από τους παράγοντες που κάνουν την ηλιακή ενέργεια όλο και πιο ελκυστική. Διαχρονικές μελέτες σχετικά με το κόστος εγκατάστασης του ηλιακού πάνελ δείχνουν ότι η τιμή του ηλιακού πάνελ μειώθηκε κατά 99,6% μεταξύ 1977 και 2015 (Luo et al., 2018). Η ανάλυση του κύκλου ζωής επιτρέπει μία συνολική ματιά σε μία ποικιλία δεδομένων, ενώ αποτελεί ένα βασικό εργαλείο συλλογής πληροφοριών που δεν σχετίζεται μονάχα με τα οικονομικά οφέλη από την πρόοδο μιας διαδικασίας ή μιας τεχνολογίας όπως φαίνεται και στο σχήμα 1. 1, αλλά επιτρέπει την διασύνδεση της διαδικασίας και με μία σειρά από κοινωνικές αξίες όπως φαίνεται στο σχήμα 1. 2.

Σχήμα 1. 1 Πλαίσιο και στάδια αξιολόγησης κύκλου ζωής



Σχήμα 1. 2 Σχέση πεδίων προστασίας και κοινωνικών αξιών

Πεδία προστασίας	Κοινωνικές αξίες
1. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	Ουσιαστική αξία της ανθρώπινης ζωής, οικονομική αξία
2. Υποβάθμιση του οικοσυστήματος	Ουσιαστική αξία της φύσης (οικοσύστημα, είδη), οικονομική αξία λειτουργιών υποστήριξης της ζωής
3. Εξάντληση των φυσικών πόρων	Οικονομικές και εσωτερικές αξίες
4. Υποβάθμιση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου	Πολιτισμικές, οικονομικές και εσωτερικές αξίες

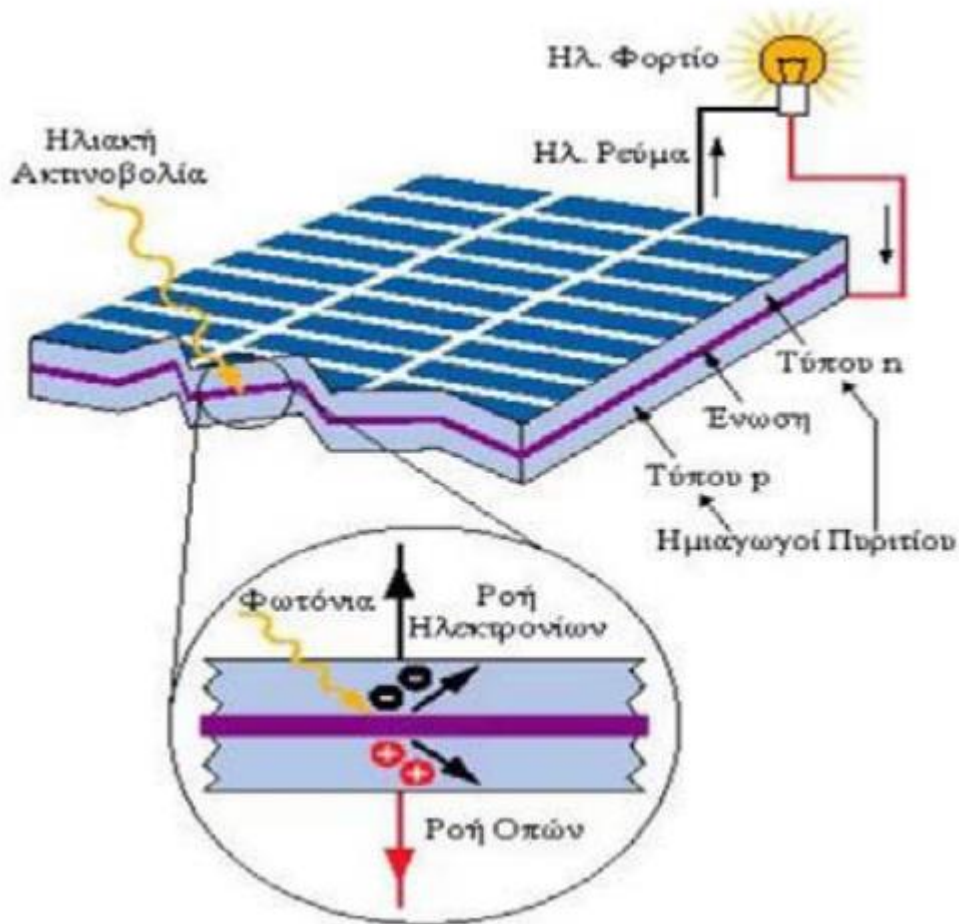
Κεφάλαιο 2. Η τεχνολογία του φωτοβολταϊκού

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια σημαντική εναλλακτική πηγή ενέργειας έναντι των ορυκτών καυσίμων και, θεωρητικά, η πιο διαθέσιμη πηγή ενέργειας στον πλανήτη. Μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, τα ηλιακά κύτταρα μετατρέπουν απευθείας την ενέργεια από τον ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια με στατικό, αθόρυβο, μη ρυπογόνο και ανανεώσιμο τρόπο. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών επιτρέπει την άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκές συσκευές. Πρόκειται για ιδιαίτερα στιβαρές και ανθεκτικές συσκευές οι οποίες είναι εξαιρετικά απλές στη σχεδίαση, ενώ παράλληλα απαιτούν λίγη συντήρηση. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα κατασκευής ως ανεξάρτητα συστήματα για την παροχή εξόδου που μπορεί να ποικίλει από μικροβάτ σε μεγαβάτ (Ziemińska-Stolarska et al., 2021).

Το βασικό δομικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών συσκευών είναι ένα στοιχείο ημιαγωγού γνωστό ως φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν να κατασκευαστούν από διαφορετικούς τύπους υλικών ημιαγωγών, ιδιαίτερα από μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Όταν οι κυψέλες είναι συνδεδεμένες, η φωτοβολταϊκή μονάδα ενσωματώνεται με έναν αριθμό πρόσθετων εξαρτημάτων, π.χ. μετατροπείς, μπαταρίες, βασικά εξαρτήματα και συστήματα στερέωσης. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συνίσταται σε μία διαδικασία κατά τη διάρκεια της οποίας παρατηρείται μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο εκμεταλλεύεται τα φωτόνια και τη μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της αξιοποίησης μιας κατάλληλης επαφής, που δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων οπών. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο προκαλεί τη θερμική διάσπαση του ατόμου δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ζεύγος ηλεκτρονίου οπών (Corcelli et al., 2019).

Με την παροχή της κατάλληλης ακτινοβολίας, αυξάνεται ο αριθμός δημιουργίας των ζευγών, ενώ η έλξη των θετικών (P) και των αρνητικών (N) υποστρωμάτων του συστήματος προκαλεί την εμφάνιση τάσης στους ακροδέκτες. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι ίσο με την παραγωγή της συγκεκριμένης τάσης (Constantino et al., 2018).

ΕΙΚΟΝΑ 2. 1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο



Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να εκπέμπουν ατμοσφαιρικούς ρύπους κατά τη λειτουργία τους και έχουν πολύ χαμηλό «αποτύπωμα άνθρακα» κατά τη διάρκεια της ζωής τους, παρέχοντας ανώτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σύγκριση με την παραγωγή. Η διεθνής αγορά φωτοβολταϊκών ηλιακών πάνελ πυριτίου αναπτύσσεται με επιταχυνόμενους ρυθμούς θα συνεχίσει με ετήσιες αυξήσεις της τάξης του 40%. Περίπου το 90% των παραγόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων χρησιμοποιεί πυρίτιο και η πρόβλεψη για την εντατικοποίηση της χρήσης αυτών των ηλιακών συστημάτων στον πλανήτη θα απαιτήσει ποσότητα πυριτίου αρκετές φορές υψηλότερη από την τρέχουσα παραγωγή (Corcelli et al., 2019).

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια από ηλιακά φωτοβολταϊκά κύτταρα (ή ηλιακά κύτταρα). Αυτές οι συσκευές έχουν πρακτικά μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη φάση λειτουργίας, επομένως μπορούν να θεωρηθούν βέλτιστη υποψήφια για υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τις τελευταίες δεκαετίες,

το ενδιαφέρον για αυτή την τεχνολογία ανανεώθηκε, χάρη στη σημαντική μείωση των τιμών των φωτοβολταϊκών κυψελών και στην παγκόσμια ανάγκη για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια σημειώθηκε βελτίωση στις παραγωγικές διαδικασίες και η έρευνα για καινοτόμα υλικά άνοιξε το δρόμο για νέου τύπου εφαρμογές. Αυτές οι πτυχές συνάδουν με την ευρωπαϊκή ενεργειακή στρατηγική, η οποία στοχεύει να προσφέρει το 2030, μείωση κατά 40% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, τουλάχιστον 32% μερίδιο του στόχου κατανάλωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (Constantino et al., 2018).

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι συσκευές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να διαφέρουν σε υλικά ημιαγωγών, μεγέθη και σχήματα. Όταν πολλά ηλιακά κύτταρα συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους και τοποθετούνται σε πλαίσιο στήριξης, σχηματίζουν μια φωτοβολταϊκή μονάδα. Πολλαπλές μονάδες μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια συστοιχία. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες και οι συστοιχίες παράγουν ηλεκτρισμό συνεχούς ρεύματος (DC) και αποτελούν μόνο ένα μέρος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Περιλαμβάνει επίσης (Soares et al., 2018):

- **Δομή στερέωσης:** μια σταθερή και ανθεκτική υποστήριξη που συγκρατεί τις φωτοβολταϊκές μονάδες και τα πάνελ προς τον ήλιο. Αυτή η δομή πρέπει να προστατεύει τη συστοιχία από εξωτερικούς παράγοντες, όπως ο άνεμος, η βροχή και η υγρασία, και να αποτρέπει τη διάβρωση για δεκαετίες. Τα συστήματα υποστήριξης είναι συνήθως κατασκευασμένα από αλουμίνιο και διαφέρουν ανάλογα με το μοντέλο και τον αριθμό των πάνελ της συστοιχίας.
- **Μετατροπέας:** ένα εξάρτημα που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τις μονάδες σε ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), η οποία χρησιμοποιείται για τοπική μετάδοση ενέργειας. Αυτή η συσκευή πρέπει να αντικατασταθεί τουλάχιστον μία φορά στη διάρκεια ζωής μιας Φ/Β γεννήτριας.
- **Σύστημα αποθήκευσης:** Χρησιμοποιείται συνήθως για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι μπαταρίες είναι απαραίτητες για την αποθήκευση ενέργειας, ειδικά για πελάτες που δεν μπορούν να συνδεθούν εύκολα στο ηλεκτρικό δίκτυο, λόγω γεωγραφικής θέσης ή υψηλού κόστους σύνδεσης στο δίκτυο. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε αυτή την εργασία, οι συγγραφείς εξετάζουν μόνο τα συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα.
- **Άλλα στοιχεία,** τα οποία περιλαμβάνουν εξαρτήματα για τη σύνδεση όλων των στοιχείων μεταξύ τους με ασφάλεια, όπως καλώδια, σύνδεσμοι και στηρίγματα. Επιτέλους, το κουτί συνδυασμού είναι ένα ουσιαστικό μέρος ενός ηλιακού ηλεκτρικού συστήματος που επιτρέπει την παράλληλη σύνδεση πολλαπλών ηλιακών μονάδων.

Τα κύρια στοιχεία ενός τυπικού φωτοβολταϊκού συστήματος, εκτός από τα πάνελ, ορίζονται ως «ισορροπία συστήματος» (BOS) (Muteri et al., 2020).

Ο στόχος της συνεχούς ανάπτυξης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι να αυξήσει τις επιδόσεις των κυψελών, να μειώσει την τιμή αγοράς των μονάδων και να βελτιστοποιήσει την ταχύτητα και το κόστος των διαδικασιών κατασκευής. Τα ηλιακά κύτταρα μπορούν να δημιουργηθούν με ένα μόνο ή πολλαπλά στρώματα υλικών που απορροφούν το φως. Στην πρώτη περίπτωση, αναφερόμαστε σε κυψέλες μονής σύνδεσης, απλές στην κατασκευή αλλά λιγότερο αποδοτικές. Αντίθετα, οι πολλαπλές διαμορφώσεις (πολλαπλοί σύνδεσμοι) έχουν διάφορους μηχανισμούς απορρόφησης και διαχωρισμού φορτίου, επομένως είναι πιο περίπλοκες και υψηλότερες επιδόσεις. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να διακριθούν με βάση την τεχνολογία και τα υλικά των ηλιακών κυψελών (Krebs-Moberg, 2021). Οι τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων ταξινομούνται γενικά σύμφωνα με τρεις γενιές, όπως φαίνεται στην εικόνα 2. 2.

ΕΙΚΟΝΑ 2. 2



- Η πρώτη γενιά περιλαμβάνει τα παραδοσιακά πάνελ με δομή βάσης κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si), ως κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si) και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si).
- Η δεύτερη γενιά βασίζεται στα ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης, τα οποία περιλαμβάνουν άμορφο πυρίτιο (a-Si), τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe) και θειούχο κάδμιο (CdS), σεληνιούχο γαλλίο ινίδιο χαλκού (CIGS)/σεληνιούχο ινίδιο χαλκού (CIS), αρσενίδιο γαλλίου (GaAs) και δομοστοιχεία διαδοχικών/πολλαπλών συνδέσεων με βάση το Si.
- Η τρίτη γενιά (ονομάζεται επίσης επόμενη γενιά) περικλείει τις καινοτόμες τεχνολογίες που δεν βασίζονται σε πυρίτιο και τις νέες πρωτότυπες συσκευές όπως οργανικά/ημι-οργανικά φωτοβολταϊκά πάνελ (OPV), ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη (PSC), ευαισθητοποιημένες ηλιακές κυψελίδες (DSSC) και ευαισθητοποιημένα ηλιακά κύτταρα (QD).

Η εξέλιξη στις διάφορες γενιές υπαγορεύτηκε από την ανάγκη βελτίωσης της σχέσης κόστους/οφέλους της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Παρά την πρόοδο, τα φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς έχουν υψηλό κόστος παραγωγής (μεταξύ 200–500 US\$/m²) και υπάρχουν ελάχιστες προοπτικές ότι αυτή η τιμή θα μειωθεί περαιτέρω (έως 150 US\$/m²), καθώς περισσότερο από το ήμισυ του κόστους οφείλεται στην ποσότητα του απαιτούμενου υλικού και των διαδικασιών που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, αυτές οι διαδικασίες κατασκευής είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, ενεργοβόρες, και αυτό έχει σημαντική επίδραση στους παράγοντες εκπομπής του κύκλου ζωής των συσκευών. Αντίθετα, η δεύτερη γενιά προσφέρει παραγωγή χαμηλού τοπικού κόστους (περίπου μεταξύ 30–110 US\$/m²), ελαχιστοποιώντας την ποσότητα του χρησιμοποιούμενου υλικού και χρησιμοποιώντας τεχνικές κατασκευής χαμηλού κόστους (stoppering, εναπόθεση ατμού κ.λπ.), αλλά οι συσκευές φτάνουν σε μέτρια απόδοση. Εάν οι συσκευές δεύτερης γενιάς επιτύχουν καλύτερες επιδόσεις απόδοσης για να κάνουν την παραγωγή μεγάλης κλίμακας ανταγωνιστική, αυτό θα οδηγήσει σε χαμηλότερους συντελεστές εκπομπών, καθώς οι διαδικασίες κατασκευής είναι λιγότερο ενεργοβόρες, σε σύγκριση με αυτές της πρώτης γενιάς. Τέλος, με την τρίτη γενιά, υπάρχει η δυνατότητα να αυξηθεί η απόδοση πολύ πέρα από αυτή της πρώτης και δεύτερης γενιάς (μέσω εναλλακτικών μηχανισμών μετατροπής ενέργειας) και να μειωθεί το κόστος παραγωγής (περίπου μεταξύ 40–150 US\$/m² για πιο αποδοτικές συσκευές), διατηρώντας έτσι τα πλεονεκτήματα των τεχνικών παραγωγής λεπτής μεμβράνης, τόσο σε ενεργειακό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο (Ludin et al., 2018).

Η αποτελεσματικότητα καθώς και τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών της πρώτης γενιάς συνοψίζονται στον πίνακα 2. 1:

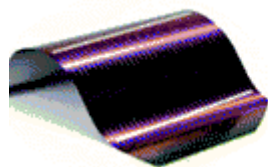
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. 1



Είδος	Βαθμός Απόδοσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	Εργαστηριακές τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 25% και 27%. Πραγματικές τιμές εμπορικών εφαρμογών κυμαίνονται μεταξύ 16 % και 25%	Υψηλή αποτελεσματικότητα	Ιδιαίτερα απαιτητική σε υλικά και ενεργοβόρα διαδικασία κατασκευής
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	Τιμές που κυμαίνονται από 15% έως 18%	Εναλλακτική που συντελεί στη μείωση κόστους παραγωγής	Σχετικά χαμηλή ικανότητα παραγωγής ενέργειας

Η αποτελεσματικότητα καθώς και τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών της δεύτερης γενιάς συνοψίζονται στον πίνακα 2. 2:

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. 2



ΔΕΥΤΕΡΗ ΓΕΝΙΑ

Είδος	Βαθμός Απόδοσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Άμορφο πυρίτιο	Τιμές εμπορικών μοντέλων που κυμαίνονται μεταξύ 4% και 8%	Οι πιο οικονομικές κυψέλες της αγοράς	Σχετικά χαμηλή απορροφητικότητα ενέργειας εγγενές χαρακτηριστικό της λεπτής μεμβράνης
Αρσενίδιο γαλλίου	Υψηλές τιμές που φτάνουν εργαστηριακά μέχρι το 29%	Σχετικά υψηλή αποτελεσματικότητα	Σχετικά υψηλό κόστος
Τελλουρίδιο καδμίου	Τιμές που κυμαίνονται από 10% έως 15%	Εκμεταλλεύεται ευρύτερο φάσμα της ακτινοβολίας Σχετικά φθινό, κατασκευάζεται από υλικά που αφθονούν, υποπροϊόντα άλλων κατασκευαστικών διαδικασιών	Παρουσιάζει σχετικά υψηλούς δείκτες τοξικότητας
Κράματα χαλκού (CIGS)	Τιμές που φτάνουν συχνά το 20%	Χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας για την κατασκευή Εμφανίζει υψηλή αντοχή σε θερμοκρασίες	Πολύ ακριβό και όχι ιδιαίτερα αποτελεσματικό, απαιτεί τοξικά χημικά κατά τη διαδικασία κατασκευής
Κράματα χαλκού (CIS)	Τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 10% και 13%	Μη ενεργοβόρα κατασκευή, ανθεκτικό	Σχετικά ακριβό

Η αποτελεσματικότητα καθώς και τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών της τρίτης γενιάς συνοψίζονται στον πίνακα 2. 3:



Είδος	Βαθμός Απόδοσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Περοβσκήτης	Τιμές από 19% έως 22%	Αποτελεσματικά, οικονομικά	Η έκθεση στα στοιχεία του περιβάλλοντος υποβαθμίζει την αντοχή και τη λειτουργία, πιθανός κίνδυνος τοξικότητας
Οργανικά	4% έως 9%	Ελαφριά, ευπροσάρμοστα, ανακυκλώσιμα, εύκολα στην παραγωγή	Χαμηλή αποδοτικότητα σταθερότητα και αντοχή
Ευαισθητοποιημένες ηλιακές κυψελίδες	Γύρω στο 10%	Ελαφριά, ευπροσάρμοστα, ανακυκλώσιμα, εύκολα στην παραγωγή, λειτουργούν με ελάχιστο φως, σταθερή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες	Δυσλειτουργία και πιθανές βλάβες σε συνθήκες παγετού, Η παρουσία ιδιαίτερα ευεξάτιστων οργανικών υλικών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στις σφραγίσεις
Ευαισθητοποιημένα ηλιακά κύτταρα	Γύρω στο 2%	Εξαιρετικά εύκολη κατασκευή	Χαμηλή απόδοση

Κεφάλαιο 3. Η ιστορία του ηλιακού πάνελ

Η ρίζα της τεχνολογίας των ηλιακών κελιών που χρησιμοποιείται σήμερα, μπορεί να εντοπιστεί στο τέλος του 19ου αιώνα, σε μία σειρά παρατηρήσεων που έγιναν όταν κατασκευάστηκαν τα πρώτα ανοικτά δίκτυα επικοινωνίας και χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά υπερατλαντικά τηλεγραφικά καλώδια. Τα καλώδια αυτά βυθίζονταν και συνέδεαν τις ηπείρους προκειμένου να υπάρχει άμεση επικοινωνία. Οι μηχανικοί αποπειράθηκαν να ελέγξουν λάθη οι αστοχίες υλικών στα βυθισμένα καλώδια με την χρήση σεληνίου. Σχετικές έρευνες απέδειξαν τα επόμενα χρόνια ότι η απόδοση του γλυκού ήταν άμεσα εξαρτώμενη από την ποσότητα του ηλιακού φωτός (Weyand et al. 2019).

Η συγκεκριμένη ανακάλυψη προκάλεσε ένα αυξημένο επιστημονικό ενδιαφέρον σε ολόκληρο τον πλανήτη, ενώ πολλοί επιστήμονες ενδιαφέρθηκαν να πειραματιστούν με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στο σελήνιο. Ο William Gryll Adams και οι συνεργάτες του θεωρούνται ότι είναι οι πρώτοι επιστήμονες που παρατήρησαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία μπορούσε κατευθυνόμενη σε ένα στερεό υλικό να προκαλέσει τη δημιουργία ηλεκτρισμού. Υπήρξε ένα εντελώς καινούργιο επιστημονικό φαινόμενο για εκείνη την εποχή (Rodriguez-Garcia, 2021). Ωστόσο η ατελής αντίληψη της επιστήμης εκείνης της εποχής για το άτομο και τις ιδιότητές του εξηγεί το γεγονός γιατί οι επιστήμονες απέτυχαν να εξηγήσουν πως ένα σταθερό υλικό μπορούσε να παράξει ηλεκτρισμό. Δεν έλειψαν μάλιστα και φαινόμενα ακραίου σκεπτικισμού που έφταναν σχεδόν μέχρι την ειρωνεία για τη σχετική εργασία που δημοσίευσε ο Adams. Ωστόσο η εξέλιξη της τεχνολογίας θα αποδείκνυε μετά από μερικά χρόνια την παρουσία των ηλεκτρονίων και των φωτονίων, επιτρέποντας στους επιστήμονες να διερευνήσουν και σταδιακά να εξηγήσουν το φαινόμενο, παρέχοντας και μία δίκαιη αξιολογία στην αρχική έρευνα του Adams (Wong et al., 2016).

Το 1839, ο Γάλλος φυσικός Alexandre-Edmond Becquerel επαλήθευσε για πρώτη φορά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στα εργαστήρια Bell. Παρατήρησε αυτό το φαινόμενο σε ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο, το οποίο ήταν κατασκευασμένο από δύο ηλεκτρόδια πλατίνας

τοποθετημένα σε ένα ηλεκτρικά αγώγιμο διάλυμα (ηλεκτρολύτη). Ο Μπεκερέλ χρησιμοποίησε χλωριούχο άργυρο διαλυμένο σε όξινο διάλυμα και παρατήρησε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα του στοιχείου αυξήθηκε όταν η εγκατάστασή του εκτέθηκε σε ηλιακό φως (Müller et al., 2021).

Το 1876, ο Βρετανός φυσικός και φιλόσοφος William Grylls Adams, μαζί με τον μαθητή του Richard Evans Day, επέδειξαν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε μια διασταύρωση ημιαγωγών πλατίνας και σεληνίου, σε ένα πείραμα το οποίο δεν παρουσίασε ιδιαίτερα καλή επίδοση. Επτά χρόνια αργότερα, ο Αμερικανός εφευρέτης Τσαρλς Φριτς κατάφερε να κατασκευάσει μια φωτοβολταϊκή συσκευή, βασισμένη σε μια ένωση χρυσού και σεληνίου, με απόδοση μετατροπής 1% (Fthenakis, 2021).

Το 1887, ο Γερμανός φυσικός Heinrich Hertz ανακάλυψε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, στο οποίο εκπέμπονται ηλεκτρόνια από ένα υλικό που έχει απορροφήσει φως με μήκος κύματος μικρότερο από την εξαρτώμενη από το υλικό συχνότητα κατωφλίου. Το 1905, ο Albert Einstein δημοσίευσε μια εργασία στην οποία εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο υποθέτοντας ότι η φωτεινή ενέργεια μεταφέρθηκε με πακέτα ενέργειας, τα οποία τώρα ονομάζουμε φωτόνια. Το ανθρακένιο ήταν η πρώτη οργανική ένωση της οποίας η φωτοαγωγιμότητα παρατηρήθηκε, τόσο από τον Pochettino, το 1906, όσο και από τον Volmer, το 1913. Το 1918, ο Πολωνός χημικός Jan Czochralski εφηύρε μια μέθοδο για την παραγωγή κρυσταλλικών υλικών υψηλής ποιότητας. Επί του παρόντος, αυτή η τεχνική είναι πολύ σημαντική για την παραγωγή μονοκρυσταλλικού πυριτίου που χρησιμοποιείται σε υψηλής ποιότητας ηλιακά κύτταρα πυριτίου (Al-Janahi et al., 2021).

Το 1953, ο Αμερικανός χημικός Dan Trivich ήταν ο πρώτος που πραγματοποίησε θεωρητικούς υπολογισμούς σχετικά με την απόδοση των ηλιακών κυττάρων για υλικά με διαφορετικές ζώνες απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας. Η πραγματική ανάπτυξη των ηλιακών κυψελών, όπως τα γνωρίζουμε σήμερα, ξεκίνησε στα εργαστήρια Bell στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το 1954, οι Calvin Fuller, Daryl Chapin και Gerald Pearson πραγματοποίησαν μια δοκιμή βασισμένη σε ηλιακή κυψέλη πυριτίου με απόδοση περίπου 6%. Την ίδια χρονιά, ο Reynolds και η ομάδα του ανέφεραν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο για έναν άλλο ημιαγωγό, το θειούχο κάδμιο (CdS) (Rawat et al., 2018).

Στα μέσα και στα τέλη της δεκαετίας του 1950, αρκετές εταιρείες και εργαστήρια άρχισαν να αναπτύσσουν ηλιακά κύτταρα με βάση το πυρίτιο για να τροφοδοτούν δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη, π.χ., η RCA Corporation, η Hoffman Electronics Corporation και το US Army Signal Corps. Η έρευνα για την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών βασίστηκε κυρίως στην παροχή ενέργειας

σε διαστημικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, ο αμερικανικός δορυφόρος Vanguard 1, ο οποίος εκτοξεύτηκε από το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ το 1958, τροφοδοτήθηκε από ηλιακά κύτταρα της Hoffman Electronics. Ήταν ο τέταρτος τεχνητός δορυφόρος από τη Γη και ο πρώτος που τροφοδοτήθηκε από ηλιακά κύτταρα. Ήταν σε λειτουργία μέχρι το 1964 και εξακολουθεί να περιφέρεται γύρω από τη Γη. Το 1962, η Bell Telephone Laboratories εκτόξευσε τους πρώτους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους με ηλιακή ενέργεια και το 1966, η NASA εκτόξευσε το πρώτο Αστρονομικό Παρατηρητήριο σε τροχιά, με ηλιακό φωτοβολταϊκό πάνελ 1 kW (Fthenakis et al., 2021).

Το 1970, ο Σοβιετικός φυσικός Zhores Alferon ανέπτυξε ηλιακά κύτταρα βασισμένα σε μια ετεροσύνδεση αρσενίου του γαλλίου. Το 1976, ο Dave E. Carlson και ο Chris R. Wronski ανέπτυξαν το πρώτο φωτοβολταϊκό φιλμ λεπτής μεμβράνης, βασισμένο σε άμορφο πυρίτιο, στα εργαστήρια της RCA. Το 1978, οι ιαπωνικές εταιρείες SHARP και Tokyo Electronics Application Laboratory ανέπτυξαν τον πρώτο ηλιακό υπολογιστή. Λόγω της πετρελαϊκής κρίσης, που προκλήθηκε από το εμπάργκο του ΟΠΕΚ το 1973, σημειώθηκε απότομη άνοδος στην τιμή του πετρελαίου. Μια τέτοια αύξηση είχε ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση του ενδιαφέροντος του κοινού για την τεχνολογία φωτοβολταϊκών για επίγειες εφαρμογές. Εκείνη την εποχή, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία πέρασε από μια εξειδικευμένη τεχνολογία στις διαστημικές εφαρμογές σε μια πιο προσιτή τεχνολογία για επίγειες εφαρμογές. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, πολλές εταιρείες άρχισαν να αναπτύσσουν φωτοβολταϊκές μονάδες και συστήματα για επίγειες εφαρμογές (Ludin et al., 2018).

Το 1980, οι πρώτες ηλιακές κυψέλες λεπτής μεμβράνης βασισμένες σε διασταύρωση καδμίου-θειούχου επιδείχθηκαν με απόδοση μετατροπής άνω του 10% στο Πανεπιστήμιο του Ντέλαγουερ. Το 1985, ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου με απόδοση άνω του 20% επιδείχθηκαν στο Πανεπιστήμιο της Νέας Νότιας Ουαλίας, Αυστραλία. Το 1991, το πρώτο φωτοβολταϊκό υψηλής απόδοσης, ευαισθητοποιημένο με χρωστικές ηλιακές κυψέλες, παρουσιάστηκε από τον Michael Grätzel και την ομάδα εργασίας του στην École Polytechnique Fédérale de Lausanne, στην Ελβετία, καθώς αυτό το στοιχείο είναι ένα είδος φωτοηλεκτροχημικού συστήματος, στο οποίο ένα ημιαγωγό υλικό τοποθετείται ανάμεσα σε μια φωτοάνοδο και έναν ηλεκτρολύτη (Blanco et al., 2020).

Σύμφωνα με το CRESEB (2019), το 1993 η παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων έφτασε το ρεκόρ των 60 MWp², με το πυρίτιο να είναι το πιο χρησιμοποιούμενο υλικό, λόγω των εξαιρετικών ημιαγωγικών ιδιοτήτων, της θερμικής σταθερότητας, του χαμηλού κόστους παραγωγής,

της αντοχής στη φθορά και της μακροχρόνιας εξυπηρέτησης.. Για σκοπούς παραγωγής φωτοβολταϊκών, το πυρίτιο μπορεί να αξιοποιηθεί σε διάφορες μορφές: μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο.

Το 1999, η συνολική εγκατεστημένη παγκόσμια φωτοβολταϊκή ενέργεια ξεπέρασε το 1 GWp. Από το 2000, τα περιβαλλοντικά ζητήματα έγιναν όλο και πιο σημαντικά στη δημόσια συζήτηση, γεγονός που ανανέωσε το ενδιαφέρον του κοινού για την ηλιακή ενέργεια. Έκτοτε, η αγορά φωτοβολταϊκών έχει μετατραπεί από τοπική σε μια παγκόσμια αγορά μεγάλης δυναμικότητας. Από το 2008, η κινεζική κυβέρνηση έχει επενδύσει πολλά στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών της. Ως αποτέλεσμα, η Κίνα έχει γίνει ο μεγαλύτερος κατασκευαστής φωτοβολταϊκών μονάδων σε παγκόσμιο επίπεδο. Το 2019, η ηλιακή ενέργεια του κόσμου ξεπέρασε την ισχύ των 627 GW (Rao et al., 2022).

Κεφάλαιο 4. Είδη ηλιακής κυψέλης

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα ταξινομούνται σε γενεές, ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους.

Κύτταρα πρώτης γενιάς ή κρυσταλλικά

Είναι κύτταρα κατασκευασμένα από στρώσεις ενός ημιαγωγού, όπως το πυρίτιο (Si) και το αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs), τα οποία μπορεί να είναι μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (mono-Si) είναι μια παλαιότερη τεχνολογία και η απόδοσή του είναι περίπου από 14% έως 21%. Τα ηλιακά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si) είναι εύκολα αναγνωρίσιμα καθώς έχουν ομοιόμορφο χρώμα, συνήθως σκούρο μπλε και τυπικά στρογγυλεμένες γωνίες. Αποτελούνται από μια κρυσταλλική και ομοιογενή δομή, όπου βρίσκεται το φωτεινό και ομοιόμορφο χαρακτηριστικό τους (Huang et al., 2017).

Στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, οι κρύσταλλοι πυριτίου συντήκονται σε ένα μπλοκ, διατηρώντας έτσι τον σχηματισμό πολλαπλών κρυστάλλων. Με ετερογενή εμφάνιση, βρίσκεται συνήθως σε μπλε, αλλά αυτό το χρώμα μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την ανακλαστική επεξεργασία που χρησιμοποιείται. Παρατηρείται η παρουσία λεκέδων στον χρωματισμό του λόγω του τύπου του πυριτίου που χρησιμοποιείται. Η απόδοσή του είναι από 13% έως 17%, λόγω της χαμηλής καθαρότητας του πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Παρόλα αυτά, είναι ευκολότερο και φθηνότερο στην παραγωγή του, καθώς δεν απαιτεί τόση πιστότητα στον βαθμό καθαρότητάς του (Blanco et al. 2020).

Κύτταρα δεύτερης γενιάς ή λεπτές μεμβράνες

Αυτές οι μονάδες κατασκευάζονται με μια λεπτή μεμβράνη, που κατασκευάζεται με την εναπόθεση ενός ημιαγωγού σε ένα υπόστρωμα. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει ημιαγωγούς κατασκευασμένους από άμορφο πυρίτιο (a-Si), τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe), σεληνίδιο του ινδίου χαλκού (CIS) και δισελενίδιο του χαλκού ινδίου (γάλλιο) (CIGS/CIS). Αυτή η τεχνολογία

υπόσχεται να μειώσει το κόστος της κυψέλης, διασφαλίζοντας αξιοπιστία, ανθεκτικότητα και ευελιξία. Χρησιμοποιώντας μικρότερη ποσότητα υλικών, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας στη διαδικασία κατασκευής του σε σύγκριση με τα κύτταρα πρώτης γενιάς (Latunussa et al., 2016).

Το πάχος των φύλλων ημιαγωγών είναι περίπου 1 μm , γεγονός που επιτρέπει, εκτός από τη χρήση μικρών ποσοτήτων υλικών ανά μονάδα, τη χρήση πλαστικών και άλλων υλικών χαμηλού κόστους για την εναπόθεση του ημιαγωγού υλικού. Τα ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης έχουν απόδοση μετατροπής ενέργειας που κυμαίνεται μεταξύ των ποσοστών του 22% και του 29% (Fu et al., 2015).

Κυψέλες τρίτης γενιάς ή πολλαπλών συνδέσεων

Πρόκειται για κελιά που επιτρέπουν πιο αποτελεσματική χρήση του ηλιακού φωτός, σε σύγκριση με κελιά που βασίζονται σε ένα μόνο στρώμα ημιαγωγών (bandgap). Γενικά, τα κύτταρα είναι εξαιρετικά αποδοτικά, έχουν χαμηλό κόστος/watt και χρησιμοποιούν μία μεγάλη ποικιλία υλικών που χαρακτηρίζεται από χαμηλή τοξικότητα. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, πολλές τεχνολογίες περιλαμβάνονται σε αυτές τις κυψέλες, αν και υπάρχει μια τάση να συμπεριλαμβάνονται οργανικές τεχνολογίες, ηλιακά κύτταρα (PQs), κυψέλες tandem/multijunction, θερμοί φορείς, ευαισθητοποιημένες ηλιακές κυψελίδες (DSSC) και τεχνολογίες μετατροπής.

Οι ηλιακές κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων είναι οι σημερινοί ηγέτες της συγκεκριμένης τεχνολογίας στον τομέα της απόδοσης και έχουν εμπορικές χρήσεις στην τροφοδοσία δορυφόρων. Το 2003, αποδείχθηκε μια τριπλή διασταύρωση με απόδοση 36% και επί του παρόντος, οι κυψέλες που βασίζονται σε αυτήν την τεχνολογία φτάνουν σε απόδοση περίπου 68%. Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει σε κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων, αποδόσεις της τάξης του 68% (χωρίς απώλειες αντίστασης) επιτυγχάνονται με τριπλές και υβριδικές συσκευές οργανικής διασταύρωσης. Κυψέλες τριπλής διασταύρωσης σε σειρά ή παράλληλα με οργανικά υποκύτταρα και περοβσκίτες θα μπορούσαν να γίνουν βασική τεχνολογία για την περαιτέρω προώθηση του ενεργειακού χάρτη απόδοσης των υπαρχουσών τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών.

Αναδυόμενες τεχνολογίες

Εκτός από τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν, υπάρχουν αρκετές άλλες εναλλακτικές τεχνικές που στοχεύουν σε χαμηλότερο κόστος παραγωγής, σε συνδυασμό με μεγαλύτερη απόδοση μετατροπής ενέργειας. Ως παραδείγματα, υπάρχουν οργανικά και πολυμερή κύτταρα,

φωτοηλεκτροχημικά κύτταρα ευαισθητοποιημένα με χρωστική ουσία (DSSC) και κύτταρα κβαντικής κουκίδας (QDSC) (Stylos et al., 2014).

Κεφάλαιο 5. Μέθοδος παραγωγής πυριτίου

Το πυρίτιο είναι ένα από τα πιο άφθονα στοιχεία στον πλανήτη, δεύτερο μόνο μετά το υδρογόνο, το ήλιο, το νέο, το οξυγόνο, το άζωτο και τον άνθρακα. Ο φλοιός της γης αποτελείται από 27,7% πυρίτιο. Το πυρίτιο (Si) είναι το χημικό στοιχείο που ανήκει στην ομάδα 14 (IV-A) της Περιοδικής Ταξινόμησης Στοιχείων, με ατομικό αριθμό 14 (14 πρωτόνια) και ατομική μάζα ίση με 28u. Σε θερμοκρασία δωματίου, είναι σε στερεά κατάσταση και μπορεί να είναι τόσο σε άμορφη όσο και σε κρυσταλλική μορφή, σε οκταεδρική δομή, με γκριζωπό μπλε χρώμα και μεταλλική λάμψη. Είναι ένα σχετικά αδρανές στοιχείο και ανθεκτικό στη δράση των περισσότερων οξέων, αλλά αντιδρά με αλογόνα και βάσεις (Yang et al., 2015).

Το πυρίτιο μεταδίδει περισσότερο από το 95% των μηκών κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, καθώς υπάρχει σε ορυκτά όπως οι άργιλοι, οι άστριοι και ο χαλαζίας, συνήθως με τη μορφή διοξειδίου του πυριτίου ή πυριτίου (SiO₂) και πυριτικών αλάτων (ενώσεις που περιέχουν πυρίτιο, οξυγόνο και μέταλλα). Είναι το κύριο συστατικό του γυαλιού, του τσιμέντου και των κεραμικών, των περισσότερων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ημιαγωγών και των σιλικονών. Στον βιομηχανικό τομέα, η παραγωγή πυριτίου γίνεται με τη μορφή μεταλλικού (μεταλλουργικού) πυριτίου ή με τη μορφή κράματος σιδηροπυριτίου, που αντιστοιχεί σχεδόν στο 95% της παραγωγής πυριτίου. Οι μεγαλύτεροι παραγωγοί σιδηροπυριτίου στον κόσμο είναι η Κίνα, η Ρωσία, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ), η Βραζιλία και η Ουκρανία. Όσον αφορά το μεταλλουργικό πυρίτιο, οι μεγαλύτεροι παραγωγοί είναι, αντίστοιχα, η Κίνα, η Βραζιλία, οι ΗΠΑ, η Γαλλία και η Νορβηγία (Latunussa et al., 2016).

Το πυρίτιο του εμπορίου (μεταλλουργικής ποιότητας - SiGM) λαμβάνεται από χαλαζία, χαλαζίτη ή πυριτική άμμο, χρησιμοποιώντας πετρελαϊκό κοκ, ορυκτό ή φυτικό άνθρακα ως αναγωγικούς παράγοντες. Η αναγωγή πραγματοποιείται σε φούρνους ηλεκτρικού τόξου με

ηλεκτρόδια άνθρακα βυθισμένα σε θερμοκρασία πάνω από 1900°C. Το υγρό πυρίτιο συσσωρεύεται στο κάτω μέρος του κλιβάνου, όπου βγαίνει και ψύχεται. Το πυρίτιο που παράγεται με αυτή τη διαδικασία έχει καθαρότητα έως και 99,5% (Blanco et al., 2020).

Για την κατασκευή συσκευών ημιαγωγών απαιτείται πυρίτιο υψηλότερης καθαρότητας, το οποίο μπορεί να ληφθεί με φυσικές ή χημικές μεθόδους. Οι φυσικές μέθοδοι καθαρισμού του μεταλλουργικού πυριτίου βασίζονται στη μεγαλύτερη διαλυτότητα των προσμίξεων που περιέχονται στο υγρό πυρίτιο, έτσι ώστε να συγκεντρώνεται στις τελευταίες στερεοποιημένες ζώνες. Η πρώτη μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε σε περιορισμένο βαθμό για την κατασκευή ραντάρ κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, συνίσταται στην άλεση του πυριτίου έτσι ώστε οι ακαθαρσίες να συσσωρεύονται στις επιφάνειες των κόκκων, από τις οποίες, με διάλυση οξέος, λαμβάνεται μια πιο καθαρή σκόνη. Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε σε βιομηχανική κλίμακα ήταν η τήξη ζώνης, η οποία συνίσταται στην τήξη του άκρου μιας ράβδου πυριτίου και στη συνέχεια αργή μετακίνηση της πηγής θερμότητας κατά μήκος της ράβδου, έτσι ώστε το πυρίτιο να στερεοποιείται με μεγαλύτερη καθαρότητα, λόγω της αντίστασης ενός μεγάλο μέρος των ακαθαρσιών στη ζώνη τήξης. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή καθαρότητα, ενώ στην συνέχεια αφαιρείται το άκρο στο οποίο συσσωρεύονται ακαθαρσίες (Latunussa et al., 2016).

Οι χημικές μέθοδοι για τον καθαρισμό του πυριτίου που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος δρουν σε μια ένωση, η οποία αποσυντίθεται για να ληφθεί το πυρίτιο με τον υψηλότερο βαθμό καθαρισμού. Οι πιο χρησιμοποιούμενες ενώσεις είναι το τριχλωροσιλάνιο (HSiCl_3), το τετραχλωριούχο πυρίτιο (SiCl_4) και το σιλάνιο (SiH_4). Μια άλλη διαδικασία καθαρισμού που χρησιμοποιείται είναι η διαδικασία Siemens. Σε αυτό, οι ανηγμένες ή μεταλλουργικές ράβδοι πυριτίου εκτίθενται σε αέριο τριχλωροσιλάνιο σε περιβάλλον με θερμοκρασία 1.150°C, προκαλώντας την αποσύνθεση και την εναπόθεση της ράβδου πυριτίου με καθαρότητα περίπου 99,9999999% (Ziemińska-Stolarska et al., 2021).

Το πυρίτιο που προκύπτει από αυτή τη μέθοδο, και άλλες παρόμοιες, έχει κλάσμα ακαθαρσίας ένα μέρος ανά δισεκατομμύριο, που ονομάζεται πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Αυτός ο τύπος πυριτίου μπορεί να παραχθεί σε διαφορετικούς βαθμούς καθαρότητας, με το ηλεκτρονικό πυρίτιο ποιότητας (SiGE) να έχει τον υψηλότερο βαθμό καθαρότητας. Εκτός από το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, η βιομηχανία φωτοβολταϊκών πάνελ χρησιμοποιεί επίσης μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Παρά το γεγονός ότι είναι πιο αποδοτικό από το πολυκρυσταλλικό, αυτός ο τύπος πυριτίου απαιτεί περισσότερη ενέργεια για την παραγωγή του, η οποία καταλήγει να αυξάνει το κόστος του. Για το λόγο αυτό, ανάλογα με τις προθέσεις του κατασκευαστή σχετικά με την προτεραιότητα (κόστος ή απόδοση),

υπάρχουν στην αγορά φωτοβολταϊκές λύσεις τόσο με SiGE όσο και με μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σχηματίζονται από κυψέλες, που παράγονται από γκοφρέτες κρυσταλλικού πυριτίου (laminae), οι οποίες, με τη σειρά τους, προέρχονται από διαδικασίες κρυστάλλωσης (Corcelli et al., 2019).

Κεφάλαιο 6. Δείκτες μέτρησης ηλιακής ενέργειας

Ο ήλιος είναι η κύρια πηγή ενέργειας για τον πλανήτη. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια σχεδόν ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, με τεράστιες δυνατότητες χρήσης της μέσω συστημάτων δέσμευσης και μετατροπής ενέργειας. Ο πλανήτης Γη, στην ετήσια κίνησή του γύρω από τον Ήλιο, περιγράφει μια ελλειπτική διαδρομή με ελάχιστη εκκεντρότητα περίπου 0,017. Ο άξονάς του παρουσιάζει μια κλίση προς το κανονικό επίπεδο της έλλειψης περίπου $23,45^\circ$. Αυτή η κλίση, μαζί με τη μεταφραστική της κίνηση, γεννά τις εποχές του χρόνου. Η μέση ετήσια πυκνότητα της ροής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία μετρούμενη σε επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση διάδοσης των ακτίνων στην κορυφή της γήινης ατμόσφαιρας ονομάζεται ηλιακή σταθερά και η μονάδα της δίνεται σε W/m^2 (Constantino et al., 2018).

Το φως λοιπόν, συλλέγεται από μία συσκευή την ηλιακή κυψέλη, μία συσκευή στην οποία συντελείται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Εκεί, αξιοποιείται η ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, δεν μετατρέπεται το συνολικό ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο βαθμός μετατροπής ποικίλει ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία και ονομάζεται βαθμός απόδοσης, με την απόδοση ενός τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου σήμερα να βρίσκεται λίγο κάτω από το 20%, βαθμούς σχετικά χαμηλός σε σχέση με την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, γεγονός που εξηγεί την ανάγκη κάλυψης μεγάλης έκτασης με φωτοβολταϊκά στοιχεία, σε σχέση με τις ανάγκες ηλεκτροδότησης (Soares et al., 2018).

Κεφάλαιο 7. Εκπομπές αερίων στον κλάδο των φωτοβολταϊκών

Αρκετές έρευνες δείχνουν ότι, εκτός από τα περιβαλλοντικά προβλήματα και την κλιματική αλλαγή, η αύξηση των συγκεντρώσεων CO₂ στο περιβάλλον θα προκαλέσει σύντομα πολλά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, όπως αύξηση καρκίνων, νευρολογικών διαταραχών και άλλων καταστάσεων. Ως εκ τούτου, πολλές βιομηχανικές χώρες αγωνίζονται να περιορίσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τις δεσμεύσεις τους βάσει της Συμφωνίας του Παρισιού (COP21) και της Ατζέντας του 2030. Για χρόνια, η Διεθνής Ομάδα για την Κλιματική Αλλαγή - IPCC έχει τονίσει τη σημασία του περιορισμού και της απαλλαγής από τις ανθρακούχες ενεργειακές απαιτήσεις για να διατηρηθεί η άνοδος της μέσης θερμοκρασίας της γης κάτω από 1,5°C, με βάση τα επίπεδα της προβιομηχανικής επανάστασης. Με βάση τα μοντέλα σεναρίων, ορισμένοι ειδικοί ζητούν την πλήρη απαλλαγή της παραγωγής ενέργειας από τον άνθρακα έως το 2050, γεγονός που σημαίνει σταδιακή μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και ταυτόχρονη αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πρόκειται για μία προσπάθεια στην οποία η παραγωγή ενέργειας μέσω της χρήσης φωτοβολταϊκών μπορεί να βοηθήσει σημαντικά (Baharwani et al., 2014).

Μεταξύ 1990 και 2008, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε κατά 40%. Το 2017, σημειώθηκε αύξηση 70% σε σχέση με τα επίπεδα του 2010. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται σε παγκόσμιο επίπεδο προέρχεται κυρίως από ορυκτές πηγές (δηλαδή άνθρακας, φυσικό αέριο και πετρέλαιο), με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να αντιστοιχεί στο 40% των παγκόσμιων εκπομπών. Όταν πρόκειται για τη μέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός ηλιακού συστήματος που χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκή τεχνολογία, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες μελέτες με βάση τη χρήση LCA. Πολλές από αυτές εκθέτουν αποτελέσματα σχετικά με τις εκπομπές άνθρακα από εμπορικά φωτοβολταϊκά συστήματα, με στοιχεία βασισμένα στα δεδομένα των κατασκευαστών του 2011 και στις εκτιμήσεις των κατασκευαστών εξοπλισμού του 2013 για μονάδες πυριτίου "micromorph" (Laleman et al., 2011).

Οι ισοδύναμες εκπομπές άνθρακα ήταν: 38,1, 27,2, 34,8, 22,8, 15,8 και 21,4 gCO₂-eq/kWh με τη μορφή κρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου, άμορφου πυριτίου, "μικρομορφικού" καμιμιγουριούχου πυριτίου ". Το LCA υπολογίστηκε αναλύοντας τα στάδια της εξαγωγής υλικού, της κατασκευής και της συναρμολόγησης του προϊόντος, εξαιρουμένων των φάσεων εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης και τέλους ζωής. Έρευνες που διεξήχθησαν κατά τα τελευταία χρόνια, δείχνουν ότι μεταξύ 2000 και 2010, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Κίνας

αυξήθηκε τρεις φορές και αντιπροσωπεύει το 12% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ το 2010. Οι ερευνητές απέδειξαν επίσης ότι η αντικατάσταση του άνθρακα με τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θα μπορούσε να μειώσει κατά 79% τις συνολικές εκπομπές CO₂ και κατά 50% την κατανάλωση νερού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με το σημερινό μείγμα πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Sumper et al., 2011).

Οι εκπομπές CO₂ στις φωτοβολταϊκές τεχνολογίες κυμαίνονταν από 9,4 έως 217 gCO₂-eq/kWh, ο παγκόσμιος μέσος όρος των εκπομπών από ηλιακές φωτοβολταϊκές μονάδες είναι περίπου 63,91 gCO₂-eq/kWh. Παράλληλα, ομάδες ειδικών μελέτησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συνδεδεμένης στο δίκτυο φωτοβολταϊκής παραγωγής ενέργειας από κρυσταλλικό πυρίτιο στην Κίνα. Οι ηλιακές μονάδες διερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας ανάλυση κύκλου ζωής (LCA). Η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) κατά τη διάρκεια κάθε διαδικασίας εκτιμήθηκαν λεπτομερώς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εκπομπές GHG κυμαίνονται από 60,1 έως 87,3 gCO₂-eq/kWh, ανάλογα με τη μέθοδο εγκατάστασης. Περίπου το 84% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και των συνολικών εκπομπών GHG σημειώθηκαν κατά τη διαδικασία κατασκευής του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η παραγωγή ηλιακού πυριτίου (SiGS) ήταν η διαδικασία που κατανάλωσε την περισσότερη ενέργεια, αντιπροσωπεύοντας, από μόνη της, περισσότερο από το 35% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας (Hosseini-Fashami et al., 2019).

Επιπλέον ομάδες ερευνητών πραγματοποίησαν μια μελέτη για την LCA, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων των πρώτων υλών που απαιτούνται για την παραγωγή κυψελών και μονάδων μέχρι το τέλος της ζωής τους. Ωστόσο, οι διαδικασίες ανακύκλωσης καθώς και η μεταφορά δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυσή τους. Η λειτουργική μονάδα (FU) ορίστηκε ως 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς παραγωγής ρεύματος από τη φωτοβολταϊκή μονάδα κατά τη διάρκεια ζωής της. Οι ερευνητές βρήκαν τιμές GHG που κυμαίνονται από 20g έως 30g-CO₂-eq/kWh. Σε μελέτη LCA που πραγματοποιήθηκε σε ολόκληρη την αλυσίδα ζωής σε διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών ηλιακών μονάδων, με τη μορφή πολυκρυσταλλικού πυριτίου, τελουρίου καδμίου και CIGS, οι ερευνητές βρήκαν τιμές GHG που κυμαίνονται από 15g έως 45g-CO₂-eq/kWh. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε και μια πλήρη ανάλυση κύκλου ζωής από το στάδιο της παραγωγής των πρώτων υλών μέχρι την απεγκατάσταση και την απόρριψή τους σε μια εγκατάσταση πολλαπλών μονάδων πυριτίου στην Κίνα, διαιρώντας τον κύκλο ζωής της σε Παραγωγή, Εγκατάσταση, Χρήση και Τέλος Ζωής. Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το στάδιο παραγωγής είχε τον μεγαλύτερο αντίκτυπο στο περιβάλλον. Οι ερευνητές βρήκαν τιμές GHG

περίπου 21 g-CO₂-eq/ kWh. Επιπλέον, προσδιόρισαν ότι ο χρόνος απόσβεσης αυτού του εξοπλισμού κυμαίνεται μεταξύ 1,16 και 2,06 ετών (Carnevale et al., 2014).

Σε παράλληλες άλλες μελέτες διερευνήθηκαν δείκτες χρόνου απόσβεσης (EPBT), ρυθμού εκπομπής αερίων θερμοκηπίου (GHG) και χρόνου απόσβεσης άνθρακα (CPBT). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το EPBT 23 σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ήταν από 0,79 έως 1,94 έτη, ο ρυθμός εκπομπής αερίων θερμοκηπίου ήταν μεταξύ 43,34 g και 106,78 g-CO₂-eq/kWh και το εύρος του CPBT ήταν μεταξύ 1,88 και 5,11 ετών. Οι συγγραφείς αναφέρουν επίσης ότι, ακόμη και σε περιοχές με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία, τα φωτοβολταϊκά πάνελ εξακολουθούν να έχουν καλή ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντικά οφέλη. Σε σύγκριση με την παραδοσιακή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα μπορούσαν να μειώσουν τις εκπομπές άνθρακα κατά 87,35% έως 94,9% (Parisi et al., 2014).

Κεφάλαιο 8. Ανάλυση κύκλου ζωής φωτοβολταϊκών

8. 1 Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς

Σε έρευνες σχετικές με τα φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς, οι ερευνητές εξέτασαν ένα δείγμα 1,2 kWp sc-Si PV (απόδοση της κυψέλης 15,3%) προσαρμοσμένο στην οροφή ενός κτιρίου στη Βραζιλία. Οι ερευνητές ανέλυσαν διεξοδικά κάθε κομμάτι της διαδικασίας, από την κατασκευή του μεταλλουργικού πυριτίου (MG-Si) έως την παραγωγή πάνελ, ενώ συμπεριέλαβαν στην έρευνά τους τις διαδικασίες των μεταφορών, της λειτουργίας και της εγκατάστασης. Διερευνήθηκε βέβαια και η ισορροπία του συστήματος (BOS), ενώ εξετάστηκαν διεξοδικά η δομή στήριξης, ο μετατροπέας καθώς και η καλωδίωση. Το μόνο στάδιο που δεν συμπεριλήφθηκε στην έρευνα ήταν αυτό του παροπλισμού. Η διάρκεια ζωής της δομής, του πίνακα και των καλωδιώσεων έφτασε τα τριάντα έτη, ενώ αντίστοιχα η διάρκεια της ζωής του μετατροπέα LT έφτασε τα δεκαπέντε έτη. Τα βασικά αποτελέσματα σχετίζονται με την διερεύνηση συσσωρευμένων απαιτήσεων σε ενέργεια (CED), τον χρόνο απόσβεσης ενέργειας (EPBT), το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) και το ποσοστό εκπομπών CO₂. Η ανάλυση συσσωρευμένων απαιτήσεων σε ενέργεια (CED) ήταν 1619 MJ/m² επιφάνειας πάνελ (Sadeghi et al., 2020).

Οι διαδικασίες που κατανάλωσαν την περισσότερη ενέργεια αφορούσαν τον καθαρισμό του MG-Si (3133 MJ), τη δομική κατασκευή (2632 MJ) και το μοντάρισμα του πίνακα (2468 MJ). Το GWP ήταν 843 kg CO₂eq καθόλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος των φωτοβολταϊκών. Τα κύρια σημεία αναφοράς ήταν η διαδικασία κατασκευής των πάνελ (159 kg CO₂eq) και η διαδικασία δομικής κατασκευής (151 kg CO₂eq). Οι ρυθμοί των εκπομπών EPBT και CO₂ διερευνήθηκαν σε διάφορα σημεία της Βραζιλίας, τα οποία εξαιτίας των διαφορετικών γεωγραφικών χαρακτηριστικών τους δέχονται και διαφορετική ακτινοβολία (από 1506 έως 1935 kWh/m² /έτος). Η πιο μεγάλη τιμή EPBT έφτασε γύρω στα 3,13 έτη ενώ η πιο χαμηλή στα 2,47 έτη. Οι ρυθμοί της εκπομπής CO₂ κυμάνθηκαν από 14,54 kg/kWh έως 18,68 kg/kWh (Kumar, 2020).

Παράλληλα, σε διάφορες άλλες μελέτες, οι ερευνητές αξιολόγησαν περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της απόδοσης των πάνελ καθώς και ισορροπία απόδοσης συστήματος sc-Si και mc-Si με σύστημα απορροφητή PCS, στην Κορέα. Ως όρια για το σύστημα θεωρήθηκαν τα στάδια των προκατασκευών, της κατασκευής, της αξιοποίησης και της τελικής διάθεσης. Οι ερευνητές διερεύνησαν δύο πιθανά σενάρια για τις επιδόσεις του φωτοβολταϊκού συστήματος: ένα κύριο

σενάριο (απόδοση: sc-Si 15,95%· mc-Si 14,91%) και ένα εξελιγμένο σενάριο (απόδοση: sc-Si 27,60%· mc-Si 20,40%). Τα ευρήματα που αφορούν το GWP στο κύριο σενάριο απέδειξαν ότι τα δύο συστήματα sc-Si και mc-Si εκπέμπουν το ένα 41,8 g CO₂eq και το άλλο 31,5 g CO₂eq. Η ιδανική περίπτωση λειτουργίας θα έφτανε να ελαττώσει το GWP των δύο συστημάτων sc-Si και mc-Si περίπου κατά 34,3% και 20%. Οι βασικοί υπεύθυνοι παράγοντες σχετικά με την εκπομπή του CO₂eq (αφορά αποκλειστικά τη διαδικασία της παραγωγής των μονάδων του πυριτίου) υπήρξαν οι διαδικασίες κατασκευής mc-Si και πλινθωμάτων, εξαιτίας της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για τον καθαρισμό του mc-Si και για τη διεργασία της κρυστάλλωσης του πλινθώματος. Το EPBT των φωτοβολταϊκών συστημάτων sc-Si και mc-Si στην περίπτωση βασικής απόδοσης ήταν 4,65 έτη και 3,68 έτη, ενώ στην δεύτερη περίπτωση βελτιωμένης απόδοσης ήταν 3,11 έτη και 2,97 έτη (Fthenakis et al., 2017).

Οι συγκεκριμένες έρευνες έχουν υπολογίσει τον χρόνο απόσβεσης CO₂ (CO₂PBT) σε συνάρτηση με τις ανάγκες του συστήματος για κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα sc-Si και mc-Si στην αρχική περίπτωση καταναλώνουν 0,56 MJ και 0,44 MJ ορυκτών καυσίμων ανά kWh, ενώ στην επόμενη περίπτωση που παρουσιάζονται βελτιωμένες επιδόσεις, φαίνεται μείωση 33% και 19,3% κατά αντιστοιχία. Ο χρόνος απόσβεσης CO₂ στην πρώτη περίπτωση ήταν 2,53 έτη (sc-Si) και 1,91 (mc-Si), ενώ στην δεύτερη περίπτωση ήταν 1,66 έτη και 1,53 έτη, αντίστοιχα. Διενεργήθηκαν αναλυτικές συγκρίσεις ευαισθησίας αναφορικά με το GWP με διαφοροποιούμενη ακτινοβολία (1301,35–1700 kWh/m² /έτος). Στα αποτελέσματα φάνηκε ότι εφόσον αυξηθεί η ακτινοβολία, προκύπτει μια μείωση GWP κατά 26% και 22% για τη βασική περίπτωση και μια μείωση 22% και 24% για την καλύτερη περίπτωση (για sc-Si και mc-Si, αντίστοιχα) (Mahmud et al., 2018).

Στην συνέχεια,, υπάρχουν μελέτες οι οποίες εκτίμησαν την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου που εκλύονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος εφόσον συνδεθεί σε ένα ευρύτερο δίκτυο (φωτοβολταϊκές μονάδες, μετατροπείς, μπαταρίες και χαλύβδινη βάση), παρακολουθώντας τις σχετικές εκπομπές καθόλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των υλικών (από την εξόρυξη δηλαδή της πρώτης ύλης, μέχρι την κατασκευή και τη λειτουργία ενός εκτεταμένου δικτύου μονάδων). Διερευνήθηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις κατασκευής πάνελ mc-Si, με την απόδοση της κυψέλης να κυμαίνεται από 14% έως 20%. Οι εκπομπές που καταγράφηκαν κυμάνθηκαν από 12,28 έως 58,81 g CO₂eq/kWh. Στο τέλος, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση των εκπομπών CO₂eq μίας μονάδας ντίζελ παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, αποδεικνύοντας ότι το αποτύπωμα άνθρακα του φωτοβολταϊκού συστήματος εμφανίστηκε

χαμηλότερο από το αντίστοιχο του σταθμού diesel παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε κάθε περίπτωση.

Παράλληλα, πρόσφατες έρευνες για την ανάλυση LCA ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με μονάδες mc-Si στην Κίνα, Διερεύνησαν το EPBT καθώς και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον ως GWP, δυναμική οξίνισης (AP), δυναμική ευτροφισμού (EP), δυναμική καταστροφής της στιβάδας του όζοντος (ODP), δυναμική φωτοχημικής δημιουργίας όζοντος (POCP) και δυναμική τοξικότητας για τον άνθρωπο (HTP), από την εξαγωγή υλών έως τα κύτταρα και την κατασκευή δομοστοιχείων. Οι ερευνητές δεν υπολόγισαν την λήξη του κύκλου ζωής (EoL), εξαιτίας της έλλειψης ακριβείας στα ερευνητικά δεδομένα στην Κίνα αναφορικά με τη φάση απόσυρσης και το BOS. Η συνολική ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας (PED) από ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας υπολογίστηκε σε 0,517 MJ/kWh (48,5% λόγω του σταδίου παραγωγής mc-Si), ενώ ο χειρότερος χρόνος απόσβεσης EPBT ήταν 6 χρόνια, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές περιοχές της Κίνας. Η μέση τιμή ήταν περίπου 2 χρόνια.

Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το AP ήταν $4,27 \times 10^{-4}$ kg SO₂eq/kWh (73,4% λόγω της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, που έχει σαν αποτέλεσμα την έκλυση διοξειδίου του θείου) και το EP ήταν $4,23 \times 10^{-5}$ kg PO₄ 3- eq/kWh (κυρίως λόγω εκπομπών οξειδίων του αζώτου και φωσφορικών αλάτων). Το εκτιμώμενο GWP του φωτοβολταϊκού συστήματος ήταν $5,09 \times 10^{-2}$ kg CO₂eq/kWh. η βασική αιτία στο GWP ήταν το διοξείδιο του άνθρακα (83,6%). Ο δείκτης HTP ήταν $17,76 \times 10^{-2}$ kg DCBeq/kWh (κυριαρχείται από τις εκπομπές στον αέρα και το γλυκό νερό (FW)). Το ODP ήταν $3,02 \times 10^{-9}$ kg R11eq/kWh (κυριαρχείται από το Halon 1301/1211 και τον τετραχλωράνθρακα) ενώ το POCP ήταν $2,69 \times 10^{-5}$ kg C₂H₄eq/kWh (προκαλούνται βασικά από εκπομπές ανόργανων και οργανικών στοιχείων στον αέρα).

Συγκρίνοντας την κάθε μία διαδικασία και τις επιπτώσεις της στο περιβάλλον, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η φάση της κατασκευής της mc-Si συνέβαλε περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη φάση στην εκπομπή ρυπογόνων, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 52,4% των επιπτώσεων που μετρήθηκαν συνολικά. Οι επόμενες σημαντικές σε επιπτώσεις διαδικασίες, είναι οι φάσεις παρασκευής μονάδων και κυψελών, με τα αντίστοιχα ποσοστά να κυμαίνονται στο 20,1% και 18,6%, αντίστοιχα. Επιπλέον, έγιναν αναλύσεις ευαισθησίας προκειμένου να διαπιστωθεί πόσο επηρεάζεται η ζήτηση της ενέργειας και ποιές μπορεί να είναι οι επιπτώσεις στο περιβάλλον μιας σειράς παραγόντων, όπως για παράδειγμα η κατανάλωση ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της παραγωγής ηλιακής μονάδας mc-Si, η χρήση και απόρριψη γυαλιού κατά τη διάρκεια της

διαδικασίας κοπής, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των κυψελών και η κατανάλωση αλουμινίου και γυαλιού κατά τη συναρμολόγηση των μονάδων.

Πρόεκυψε ότι μια μείωση κατά 10% στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά την παραγωγή ηλιακής μονάδας mc-Si θα οδηγούσε σε πτώση 3,37% στο PED, 3,97% στο AP, 3,81% στο EP, 3,56% στο GWP και 3,21% στο POCP. Μια μείωση της τάξης του 10% της κατανάλωσης αλουμινίου κατά τη φάση συναρμολόγησης της μονάδας, θα οδηγούσε σε πτώση της ODP κατά 7,01%. Μια μείωση της τάξης του 10% στην κατανάλωση και απόρριψη γυαλιού κατά τη διαδικασία κοπής του υλικού θα οδηγούσε σε μείωση 2,11% στο HTP ενώ μια μείωση της τάξης του 10% στην αξιοποίηση ατμού θα οδηγούσε σε μείωση που κυμαίνεται από 0,46% (EP) έως 1,06% (AP) (Muteri et al., 2020).

Επίσης, διεξήχθησαν έρευνες που εστιάζουν στην μαζική παραγωγή για μια μονάδα φωτοβολταϊκών mc-Si στην Κίνα. Οι συγκεκριμένες έρευνες επικεντρώθηκαν στο διεθνές εμπόριο, το οποίο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της κινεζικής βιομηχανίας φωτοβολταϊκών και διέκριναν τις εγχώριες από τις εισαγόμενες πρώτες ύλες. Οι ερευνητές υπογράμμισαν τη σημασία του διεθνούς εμπορίου επειδή προκαλεί το διαχωρισμό της κατανάλωσης και της παραγωγής των φωτοβολταϊκών προϊόντων, τα οποία είναι δύο ξεχωριστές σημαντικές φάσεις με διαφορετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Εξέτασαν τρία σενάρια: το σενάριο 1 (βασική γραμμή), στο οποίο όλα τα υλικά θεωρούνταν ότι παράγονται στην Κίνα και οι διεθνείς συναλλαγές αγνοήθηκαν. Το σενάριο 2, στο οποίο το mc-silicon εισήχθη ως πρώτη ύλη, και το σενάριο 3, που αντιπροσώπευε το μερίδιο αγοράς όλων των πρώτων υλών από διάφορες πηγές. Για καλύτερη σύγκριση με άλλες μελέτες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ελήφθη υπόψη μόνο η φάση κατασκευής.

Υπολογίστηκαν οι ακόλουθες επιπτώσεις: GWP100, δυναμικό αβιοτικής εξάντλησης (ADP), AP, EP, HTP, δυναμικό οικολογικής τοξικότητας στο γλυκό νερό (FAEP), δυναμικό οικολογικής τοξικότητας σε θαλασσινό νερό (MAEP), χερσαία δυναμική οικοσυστημικής τοξικότητας (TETP), ODP και POCP. Το GWP ήταν $2,91 \times 10^3$ kg CO₂eq για το σενάριο 1 και περίπου $2,22 \times 10^3$ kg CO₂eq για τα σενάρια 2 και 3. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η παραγωγή mc-Si εισαγωγής, απαιτεί λιγότερη ενέργεια από την αντίστοιχη που χρειάζεται η τοπική παραγωγή. Η παραγωγή Mc-Si ήταν το κομβικό σημείο του GWP ολόκληρης της διαδικασίας. Ωστόσο, η συσκευασία των φωτοβολταϊκών μονάδων συνέβαλε επίσης σημαντικά στο GWP. Αυτές οι διαδικασίες

αντιπροσώπευαν το 52% και 29% του GWP στο σενάριο 1, 38% και 38% στο σενάριο 2 και 39% και 38% στο σενάριο 3.

Η παρασκευή φωτοβολταϊκών μονάδων όπως έγινε στα σενάρια 2 και 3 επέτρεψε να μειωθούν οι επιπτώσεις σε 8 από 10 παράγοντες που διερευνήθηκαν. Συγκεκριμένα, το σενάριο 2 ήταν παρόμοιο αλλά δεν εμφάνισε καλύτερες τιμές από το σενάριο 3. Το σενάριο 1 ήταν η καλύτερη επιλογή για την ADP και την ODP, αλλά η χειρότερη επιλογή για όλες τις άλλες επιπτώσεις σε σύγκριση με τα σενάρια 2 και 3. Παρόμοια με το GWP, οι διαδικασίες του mc-Si, η παραγωγή και η συσκευασία των φωτοβολταϊκών μονάδων ήταν τα κύρια σημεία αναφοράς για όλες τις επιπτώσεις, εκτός από το MAEP και το FAEP, όπου τα βαρέα μέταλλα ήταν επίσης σημαντικά.

Παράλληλα σε συγκεκριμένη έρευνα που έγινε στην Κίνα, εκτιμήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής που σχετίζονται με τα φωτοβολταϊκά κύτταρα (mc-Si). Η παραγωγή φωτοβολταϊκών κυψελών mc-Si είχε σημαντική επίδραση στις τιμές των επιπτώσεων σε RI, GWP και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά αντιπροσωπεύει σχετικά μικρή επίδραση στις τιμές που αφορούν σε CNG, NCG και TETP. Η συμβολή της παραγωγής mc-Si PV κυττάρων στις υπόλοιπες κατηγορίες ήταν αμελητέα. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης ευαισθησίας έδειξε ότι περισσότερο από το 25% της συνολικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης θα μπορούσε να μειωθεί με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, την επιλογή δευτερογενούς αλουμινίου για παραγωγή mc-Si και τη μείωση της κατανάλωσης πλακιδίων mc-Si για την παραγωγή φωτοβολταϊκών κυψελών.

Ομάδες ερευνητών παράλληλα, ανέλυσαν μια καινοτόμο διαδικασία για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πάνελ πυριτίου, θεωρώντας ότι αυτή η φάση παραμελείται σε γενικές γραμμές και ότι η φάση απόρριψης θα μετατραπεί σε ένα σχετικό περιβαλλοντικό ζήτημα στο μέλλον. Η ανάλυση ακολούθησε μια προσέγγιση διερεύνησης ολόκληρης της αλυσίδας, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επιπτώσεις από την παράδοση των απορριμμάτων στη μονάδα ανακύκλωσης, μέχρι τη διαλογή των διαφορετικών ανακυκλώσιμων υλικών και τη διάθεση των υπολειμμάτων.

Όλες αυτές οι επιπτώσεις υπολογίστηκαν εξαιρουμένων των πιστώσεων που προέρχονται από την ανάκτηση ενέργειας. Οι πιστώσεις που σχετίζονται με αυτήν την ανάκτηση ενέργειας ήταν σημαντικές (περίπου 30%) για κατηγορίες επιπτώσεων όπως ODP, IR (οικοσυστήματα), IR (HH), CC, AE και PM. Το CED θα μπορούσε επίσης να μειωθεί από 3150 MJ σε 2780 MJ. Τα αποτελέσματα τόνισαν επίσης ότι οι περισσότερες επιπτώσεις για τη διαδικασία ανακύκλωσης οφείλονται στη μεταφορά των απορριμμάτων φωτοβολταϊκών στην τοποθεσία, στην αποτέφρωση πλαστικών και στην περαιτέρω επεξεργασία για την ανάκτηση μετάλλων από την τέφρα του πυθμένα.

Οι ερευνητές παρουσίασαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συνδεδεμένης στο δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από c-Si φωτοβολταϊκά, σε άλλες έρευνες. Οι ερευνητές περιέλαβαν το BOS και τα ορυκτά καύσιμα που καίγονται κατά τη μεταφορά και τη συναρμολόγηση. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε όρους EPBT και GHG. Το EPBT κυμαίνεται από 1,6 και 2,3 έτη, ενώ τα GHG κυμαίνονταν από 60,1 έως 87,3 g CO₂eq/kWh. περίπου το 84% ή και περισσότερο της κατανάλωσης ενέργειας και των συνολικών εκπομπών GHG που προέρχονται από τη διαδικασία κατασκευής των φωτοβολταϊκών. Επίσης, οι ερευνητές υπογράμμισαν ότι μια βελτίωση στην απόδοση (από το πραγματικό 16–18% σε 22% ή υψηλότερη στο μέλλον) θα μπορούσε να επιτευχθεί για το εξεταζόμενο c-Si με την εφαρμογή διάχυσης PERL ή ετεροσύνδεσης με ενδογενή λεπτή κυψέλη στρώσης (HIT) και αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε εκπομπή GHG 47,5 g CO₂eq/kWh.

Διεξήχθησαν έρευνες για να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις στον κύκλο ζωής ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος 1,5 kW. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές εξέτασαν το ποσοστό εκπομπών κύκλου ζωής (LCER), GWP, CED, EPBT και καθαρή αναλογία ενέργειας (NER) έξι διαφορετικών τοποθεσιών στη Νιγηρία, μία για κάθε μία από τις γεωπολιτικές ζώνες. Τα διαφορετικά αποτελέσματα εξαρτώνται από τις διαφορετικές ακτινοβολίες των ζωνών. Το LCER κυμαίνονταν από 37,3 έως 72,2 g CO₂/kWh και το CED από 380 έως 8700 MJeq, το GWP κυμαίνονταν από 1907 έως 5819 kg CO₂eq, το EPBT από 0,82 έως 2,3 χρόνια και το NER από 7,08 έως 301.

Διερευνήθηκαν και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής ενός mc-PV συστήματος στην Κίνα, με ιδιαίτερη έμφαση στις φάσεις παροπλισμού και ανακύκλωσης των υλικών. Η φάση της ανακύκλωσης περιλαμβάνει την αποσυναρμολόγηση των μονάδων και τις διαδικασίες που συνδέονται με κύρια στοιχεία όπως γυαλί (επανάτηση γυαλιού), αιθυλένιο οξικό βινύλιο (EVA) (θερμική επεξεργασία EVA) και χημική επεξεργασία αλουμινίου, αργέντου και πυριτίου. Η λειτουργική μονάδα είναι το στοιχείο του LCA στο οποίο αναφέρονται όλες οι εισοδοί και οι έξοδοι του υπό μελέτη συστήματος. Επομένως, κατά τη σύγκριση δύο διαφορετικών συστημάτων, πρέπει να χρησιμοποιείται η ίδια λειτουργική μονάδα. Η λειτουργική μονάδα (FU) ήταν ένα mc-Si PV μονάδα χωρητικότητας 1 kW, που περιέχει πέντε μονάδες 200 Wp.

Οι ερευνητές υπολόγισαν 14 μεσαίες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις φάσεις παραγωγής και ανακύκλωσης, αποκλείοντας μόνο τις φάσεις μεταφοράς και χρήσης από την ανάλυση. Οι 14 περιβαλλοντικές επιπτώσεις αναλύθηκαν για κάθε διαδικασία και έγινε σύγκριση δύο διαφορετικών σεναρίων (υγειονομικής ταφής και ανακύκλωσης). Η παραγωγή Mc-Si, η επεξεργασία κυψελών και η συναρμολόγηση μονάδων ήταν οι φάσεις με τις υψηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Εστιάζοντας στο EoL, το σενάριο ανακύκλωσης παρουσίασε λιγότερες

περιβαλλοντικές επιπτώσεις από το σενάριο υγειονομικής ταφής: ακόμα κι αν η αποσυναρμολόγηση των μονάδων και η επεξεργασία των κύριων στοιχείων στη διαδικασία ανακύκλωσης είχαν κάποια περιβαλλοντική επιβάρυνση, η σχετική επίπτωση ήταν ακόμα χαμηλότερη από το σενάριο υγειονομικής ταφής (Hong et al., 2016).

Διεξήχθη και μία συγκριτική έρευνα LCA παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στη Σιγκαπούρη με τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις mc-Si φωτοβολταϊκών. Η FU ήταν μια φωτοβολταϊκή μονάδα πυριτίου 60 κυψελών και το όριο μελέτης του συστήματος εκτείνεται από την εξόρυξη πυριτίου μέχρι την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι δείκτες για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ήταν οι εκπομπές EPBT και GHG. Τα τρία διαφορετικά φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα στην οροφή αποτελούνταν από: (1) ηλιακά κύτταρα οπίσθιας επιφάνειας από αλουμίνιο (Al-BSF) με συμβατική δομή δομοστοιχείων (δηλ. γυαλί/ενθυλακωτή/κυψέλη/ενθυλακωτή/οπίσθιο φύλλο), (2) ένα παθητικοποιημένος πομπός και συσκευή οπίσθιου κυττάρου (PERC) με συμβατική δομή δομοστοιχείων και (3) ηλιακή κυψέλη PERC με δομή πλαισίου διπλού υαλοπίνακα χωρίς πλαίσιο (δηλαδή γυαλί/ενθυλακωτή/κυψέλη/ενθυλακωτή/γυαλί). Για τα εξεταζόμενα σενάρια τα EPBT ήταν 1,11, 1,08 και 1,01, αντίστοιχα, ενώ οι εκπομπές GHG ήταν 30,2, 29,2 και 20,9 g CO₂eq/kWhe, αντίστοιχα (Muteri et al., 2020).

8. 2 Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς

Η δεύτερη γενιά (ή φωτοβολταϊκά λεπτής μεμβράνης) περιλαμβάνει ηλιακά κύτταρα χαμηλού πάχους που κατασκευάζονται με την εναπόθεση στρωμάτων ημιαγωγών σε στερεά και χαμηλού κόστους υποστρώματα από γυαλί, πλαστικό ή μέταλλο. Το στρώμα ημιαγωγού μπορεί να κατασκευαστεί με μια ένωση διαφορετικών υλικών όπως κάδμιο, ίνδιο, γάλλιο, τελλούριο και χαλκό. Αυτά τα υλικά είναι λιγότερο ακριβά στην κατασκευή από το καθαρό πυρίτιο, αλλά γεωγραφικά συγκεντρώνονται μόνο σε ορισμένες περιοχές και, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δύσκολο να εξορυχθούν. Σειρά ερευνών αποκαλύπτει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αντικατάστασης της ορυκτής ηλεκτρικής ενέργειας με ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στη Δυτική Ευρώπη στον κύκλο ζωής δύο τύπων φωτοβολταϊκών μονάδων: μιας διπλής μονάδας GaInP/GaAs λεπτής μεμβράνης (απόδοση 28,5%) και μιας κλασικής mc -Μονάδα Si (η απόδοση ήταν 14,4%). Η μελέτη εξέτασε δύο σενάρια: το σενάριο 0, στο οποίο οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε ενότητας υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα (σκληρός και καφές άνθρακας, βιομηχανικό και φυσικό αέριο, πετρέλαιο και τύρφη) και το σενάριο S, με βάση την υπόθεση ότι η ποσότητα της ορυκτής ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται στον κύκλο ζωής κάθε μονάδας αντικαταστάθηκε με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την αντίστοιχη μονάδα (Hong et al., 2016).

Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι, και για τα δύο σενάρια, οι κατηγορίες επιπτώσεων που είχαν μεγαλύτερο όφελος από την αντικατάσταση της ορυκτής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκό ήταν οι ADP, AP, GWP, MAEP και POCP. Για τη μονάδα GaInP/GaAs, οι βαθμολογίες επιπτώσεων μειώνονται έως και 4,9 (GWP), ενώ για τη μονάδα mc-Si οι βαθμολογίες επιπτώσεων μειώθηκαν έως και 2,5 (ADP και GWP). Οι κατηγορίες επιπτώσεων που συνδέονται με την τοξικότητα ήταν μικρότερες ή αμελητέες, συγκρίνοντας τα δύο σενάρια. Στην πραγματικότητα, υπάρχει η επικάλυψη ενός οφέλους λόγω της μείωσης της χρήσης ορυκτών καυσίμων και μιας αρνητικής πτυχής που σχετίζεται με την αύξηση των υλικών (χρώμιο χάλυβα για GaInP/GaAs και αλουμίνιο για τη μονάδα

mc-Si, ειδικότερα) για την παραγωγή πρόσθετων φωτοβολταϊκών μονάδων για την παραγωγή της απαραίτητης ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράλληλα σειρά ερευνητών εστίασαν σε νέες εφαρμογές υλικών νανο-κρυσταλλικού πυριτίου (nc-Si) σε συνδυασμό με συσκευές a-Si. Σε αυτή την περίπτωση, η φωτοβολταϊκή μονάδα λειτουργούσε σε σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο και εγκαταστάθηκε σε στέγη στη Νότια Ευρώπη. Οι ερευνητές ανέλυσαν τον κύκλο ζωής του a-Si και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της προσθήκης στρώματος nc-Si (αυτή η προσέγγιση ονομάζεται τεχνολογία «micromorph»). Εξέτασαν επίσης δύο διαφορετικές διαδικασίες καθαρισμού (με SF₆ και NF₃) κατά τη φάση κατασκευής της μονάδας και δύο διαφορετικές τιμές απόδοσης: η απόδοση της μονάδας micromorph ήταν 8,5%, ενώ η καλύτερη απόδοση άμορφου ήταν 6,7%. Παρά την υψηλή αυτή απόδοση, η χρήση της νέας τεχνολογίας είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερες απαιτήσεις σε υλικά (17–20 φορές υψηλότερες) και συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις (45% υψηλότερες). Οι εκπομπές GHG για τα κύτταρα a-Si ήταν χαμηλότερες από 40 g CO₂eq/kWh, ενώ ήταν περισσότερες από 70 g CO₂eq/kWh για τα κύτταρα nc-Si/a-Si (τεχνολογία micromorph) (Muteri et al., 2020).

Οι ερευνητές εξέτασαν επίσης σενάρια βελτίωσης (πιθανότατα, αισιόδοξα και Oerlikon Solar process) που περιελάμβαναν αύξηση του συντελεστή απόδοσης διεργασίας από 70% σε 93%, μείωση πάχους κάτω στρώματος (από 2000 σε 1300 nm). Και μια βελτίωση στη χρήση του αερίου NF₃. Σε όλα τα σενάρια, η τεχνολογία a-Si έδειξε GHG χαμηλότερα από 30 g CO₂eq/kWh, ενώ για το συνδυασμό κυψελών nc-Si/a-Si, οι εκπομπές GHG ήταν πάντα υψηλότερες από 40 g CO₂eq/kWh εκτός από την αισιόδοξη και τη διαδικασία Oerlikon με Καθαρή επεξεργασία SF₆. Συμπερασματικά, οι εκπομπές GHG για την τεχνολογία micromorph οδήγησαν σε αύξηση 60–85% για την καθαρή επεξεργασία NF₃ και 15–90% στην καθαρή επεξεργασία SF₆, σε σύγκριση με την τεχνολογία a-Si. Επιπλέον, οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι η χρήση του NF₃ οδηγεί σε υψηλότερες εκπομπές GHG σε σύγκριση με το SF₆, ιδιαίτερα όταν η παραγωγή NF₃ και η διαδικασία καθαρισμού εφαρμόζονται στην τεχνολογία μικρομορφών.

Μια μελέτη περιβαλλοντικών δεικτών και EPBT φωτοβολταϊκών συστημάτων CdTe έγινε με ανάλυση εκπομπών GHG. Οι ερευνητές επικεντρώθηκαν σε ένα επίγειο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη, με απόδοση 10,9% και υπολόγισαν τις εκπομπές GHG και τον δείκτη EPBT. Το EPBT ήταν από 0,7 έως 1,1 έτη, ενώ οι εκπομπές GHG κυμαίνονταν από 19 έως 30 g CO₂eq, ανάλογα με την τοποθεσία. Μέσω της μεθόδου CML2001, άλλοι πέντε δείκτες επιπτώσεων αξιολογήθηκαν σε αυτή τη μελέτη: πρωτογενής ενέργεια από πόρους (PE), AP, EP, GWP και POCP (Mahmud et al., 2018). Παράλληλα έρευνες εστιάστηκαν και σε μια συγκριτική

LCA σχετικά με την απόσβεση ενέργειας δύο διαφορετικών τεχνολογιών (ενότητες πολλαπλών συνδέσεων a-Si και nc-Si/a-Si). Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν μια προσέγγιση που μελέτησε τα σχετικά φαινόμενα κατά τη διαδικασία της κατασκευής μέχρι τη διαδικασία της λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη φάση παραγωγής (χωρίς ανακύκλωση ή απόρριψη). Υιοθέτησαν αποτελεσματικότητα 6,3% για το παρόν και 8% για μελλοντικές εφαρμογές. Οι μονάδες nc-Si/a-Si απαιτούσαν μια ποσότητα ενέργειας μεταξύ 750 και 1270 MJ/m², ενώ η μονάδα τριπλής διασταύρωσης απαιτούσε 860 MJ/m². Το EPBT (nc-Si και a-Si) ήταν 0,7–0,9 έτη, ενώ το EPBT τριπλής διασταύρωσης ήταν 0,8 έτη (Hong et al., 2016).

Παράλληλα ομάδα ερευνητών πραγματοποίησε LCA μελέτη για διαδοχικά εύκαμπτα ηλιακά κύτταρα που αποτελούνται από a-Si/nc-Si (απόδοση 10%). Οι συγγραφείς έκαναν επίσης μια σύγκριση μεταξύ του ενσωματωμένου σε στέγη φωτοβολταϊκού συστήματος a-Si/nc-Si και του φωτοβολταϊκού συστήματος mc-Si τοποθετημένου σε οροφή (απόδοση 14,4%), αμφότερα στην Ολλανδία με ετήσια μόνωση 1000 kWh/m². Το EPBT για το φωτοβολταϊκό σύστημα a-Si/nc-Si ήταν 2,3 έτη και 3,4 για το σύστημα mc-Si, ενώ το CED ήταν 1,4 MJ/kWh και για τα δύο συστήματα. Οι συγγραφείς υπολόγισαν 18 δείκτες μεσαίου σημείου και αξιολόγησαν το τελικό σημείο λαμβάνοντας υπόψη τη ζημιά στην ανθρώπινη υγεία, στο οικοσύστημα και στην εξάντληση των πόρων. Οι συνολικές βαθμολογίες ζημιών του φωτοβολταϊκού συστήματος a-Si/nc-Si και του φωτοβολταϊκού συστήματος mc-Si ήταν 0,012 και 0,010 Οικοσημεία/kWh, αντίστοιχα. CC, HTP, σχηματισμός PM και FD συνέβαλαν στο 96% των συνολικών βαθμολογιών ζημιών και για τα δύο φωτοβολταϊκά συστήματα.

Επιπλέον εξετάστηκε από ομάδα ειδικών μια διαδικασία για τη μείωση της κατανάλωσης σιλανίου κατά την κατασκευή δύο τύπων φωτοβολταϊκών: ενός υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου (a-Si:H) με βάση το PV και ενός διαδοχικού (a-Si:H/mc-Si:H) με ένα φωτοβολταϊκό βασισμένο στην τεχνολογία λεπτής μεμβράνης. Τα δεδομένα αποθέματος βασίστηκαν σε δεδομένα εισόδου στις ΗΠΑ και την Ευρώπη, ενώ η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε ήταν «από λίκνο σε πύλη». Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση μεταξύ ανακύκλωσης και μη ανακύκλωσης. Με τη χρήση μιας διαδικασίας ανακύκλωσης, η κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε (ανά κιλό χρησιμοποιούμενου σιλανίου) από 1146 σε 409 MJ για a-Si:H και σε 397 MJ για τη διαδοχική μονάδα a-Si:H/mc-Si:H. Οι εκπομπές GHG μειώθηκαν (ανά κιλό ακατέργαστου σιλανίου) από 61,3 kg CO₂ σε 22 kg CO₂ για το a-Si:H και σε 21,2 kg CO₂ για τη διαδοχική μονάδα a-Si:H/mc-Si:H.

Όσον αφορά τη σημασία της φάσης EoL,, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη LCA μιας νέας επεξεργασίας βασισμένης σε μηχανική διαδικασία και σύστημα ανακύκλωσης, για το TFSC. Σε αυτή

τη μελέτη, λήφθηκε υπόψη μόνο η φάση EoL μιας μονάδας CdTe. Η ανάλυση, βασισμένη στη μεθοδολογία Impact 2002+, επέτρεψε να υπογραμμιστούν τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας ανακύκλωσης που οδήγησε σε μείωση όλων των κατηγοριών επιπτώσεων σε σύγκριση με την αποτέφρωση, εκτός από τα IR και LO. Κυρίως, τα πλεονεκτήματα συνδέθηκαν με το γυαλί (το στοιχείο που χρησιμοποιείται περισσότερο στην υλοποίηση της φωτοβολταϊκής μονάδας), το τελλουρίδιο του καδμίου και την ανάκτηση θείου και καδμίου, που συνέβαλαν θετικά στη μείωση του GWP και στην κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας (Weyand et al. 2019).

Ομάδα ερευνητών εξέτασε δύο νέες πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης: θειούχο κασσίτερο χαλκού ψευδάργυρου (CZTS ή CuZnSnS_4) και φωσφίδιο ψευδαργύρου (Zn_3P_2). Οι συγγραφείς υπέθεσαν ένα μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας από τις Ηνωμένες Πολιτείες και μια απόδοση 10% και για τα δύο πάνελ. Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε ήταν «από λίκνο σε πύλη» και η μέθοδος ανάλυσης επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA) ήταν TRACI 2.1. Και για τις τέσσερις επιπτώσεις που μελετήθηκαν (PED, GWP, FW χρήση και οικοτοξικότητα (Ex)), μια σύγκριση μεταξύ των νέων φωτοβολταϊκών λεπτής μεμβράνης (Zn_3P_2 και CZTS), των «παλιών» φωτοβολταϊκών λεπτής μεμβράνης (a-Si, CdTe, CIGS), και κατασκευάστηκαν τα PV c-Si (sc-Si και mc-Si) (Rodriguez-Garcia, 2021).

Τα CdTe και Zn_3P_2 είχαν παρόμοιες επιπτώσεις και ξεπέρασαν τις επιδόσεις των CIGS και CZTS. Οι επιπτώσεις από το CdTe ήταν ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές του Zn_3P_2 , εκτός από το GWP. Σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά που βασίζονται σε Si, και οι τέσσερις τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης ξεπέρασαν τις επιδόσεις του sc-Si και του mc-Si στις κρούσεις ως χρήση Ex και FW. Το CdTe και το Zn_3P_2 είχαν καλύτερες επιδόσεις για το GWP και το PED και είχαν επιπτώσεις παρόμοιες με το κύτταρο a-Si. Όσον αφορά την ανάλυση κυριαρχίας, η φάση κατασκευής ήταν ο μεγαλύτερος συνεισφέρων για όλες τις τεχνολογίες. Ομάδα ερευνητών στις Ηνωμένες Πολιτείες, πραγματοποίησε μια υβριδική LCA για να συγκρίνει τις περιβαλλοντικές, ΗΗ και τις συνέπειες των φυσικών πόρων της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις τεχνολογίες CIGS και CdTe, στις Ηνωμένες Πολιτείες. Οι ερευνητές ανέπτυξαν δύο καταλόγους κύκλου ζωής για ζυγαριές εδάφους και φωτοβολταϊκά συστήματα κατανεμημένης κλίμακας που τοποθετούνται στην οροφή. Θεωρήθηκε ως τρέχουσα απόδοση 12% για το CIGS και 11,6% για το CdTe και μελλοντική βελτίωση (για το 2030) σε 20,8% και 19%, αντίστοιχα. Επιπλέον, εξετάστηκε μείωση του πάχους για το μελλοντικό σενάριο (Hong et al., 2016).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι κατηγορίες πρόσκρουσης ήταν παρόμοιες και για τις δύο εναλλακτικές λύσεις επίγειας, εκτός από το LO (καθώς τα φωτοβολταϊκά στην οροφή δεν

χρησιμοποιούν απευθείας γη). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών λεπτών μεμβράνης των ΗΠΑ ήταν τουλάχιστον 90% χαμηλότερες από αυτές του μείγματος δικτύου των ΗΠΑ σε επτά από τις 12 κατηγορίες (AP, GHG, FD, αναπνευστικά αποτελέσματα, φωτοχημική οξείδωση (POx), Ex και EP). Συγκεκριμένα, το CdTe και το CIGS εκτιμήθηκε ότι εκπέμπουν 20 και 22 g CO₂eq/kWh στο παρόν σενάριο. Λαμβάνοντας υπόψη το μελλοντικό σενάριο, οι εκπομπές GHG του κύκλου ζωής από το CdTe και το CIGS μειώθηκαν κατά 69% σε σύγκριση με τις εκτιμήσεις τους, σε 6 και 7 g CO₂eq/kWh, αντίστοιχα (Muteri et al., 2020).

Παράλληλα πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική LCA των διαδοχικών ηλιακών μονάδων chalcogenide/Si και διερεύνησαν τις περιβαλλοντικές επιδόσεις των διαδοχικών ηλιακών κυψελών CIGS/Si, CZTS/Si και AZTS/Si, σε σύγκριση με τις ηλιακές μονάδες Si. Η αποτελεσματικότητα αυτών των μονάδων ήταν 22% και χρησιμοποιήθηκε μια πλήρης προσέγγιση από την διαδικασία κατασκευής των πρώτων υλών μέχρι τη διαδικασία απόσυρσης των μηχανημάτων. Τα Si και CIGS/Si παρουσίασαν τις χειρότερες επιπτώσεις για τις περισσότερες από τις εξεταζόμενες κατηγορίες (Mahmud et al., 2018).

Σε μια πρόσφατη μελέτη, η ερευνητική ομάδα αξιολόγησε το EPBT, τον συντελεστή παραγωγής ενέργειας (EPF) και τον συντελεστή μετατροπής κύκλου ζωής (LCCE) ενός φωτοβολταϊκού συστήματος CdTe 3,2 kW στην Ινδία. Η απόδοση του κυττάρου ήταν 11%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το EPBT ήταν 3,6 έτη, το EPF ήταν 0,27 και το LCCE ήταν 0,0018. Αυτά τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με ορισμένες από τις μελέτες που συζητήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, διαπιστώνοντας ότι το EPBT ήταν υψηλότερο από τις άλλες περιπτώσεις. Εν πάση περιπτώσει, όλες οι μελέτες διέφεραν ως προς την τοποθεσία, τη συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα και, μόνο σε δύο περιπτώσεις, η σύγκριση αφορούσε την ίδια τεχνολογία (CdTe).

8. 3 Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς

Τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς αναφέρονται σε όλα τα καινοτόμα ηλιακά κύτταρα που δεν βασίζονται σε πυρίτιο και που έχουν αναπτυχθεί για να ξεπεραστεί η εξάρτηση από τους παραδοσιακούς ημιαγωγούς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά. Επιπλέον, αυτές οι τεχνολογίες στοχεύουν στην επίτευξη υψηλότερης απόδοσης και στη μείωση του κόστους ανά watt κορυφής, σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές. Δεδομένου ότι οι ηλιακές συσκευές τρίτης γενιάς έχουν αποδείξει τις φωτοβολταϊκές επιδόσεις τους σε εργαστηριακή κλίμακα ή τη λειτουργία τους μόνο σε επίπεδο πρωτοτύπων, οι περισσότερες από τις ακόλουθες μελέτες είναι αρκετά πρόσφατες. Επιπλέον, πολλές από αυτές τις τεχνολογίες δεν έχουν φτάσει ακόμη στη σωστή τεχνολογική ωριμότητα (από άποψη απόδοσης και διάρκειας ζωής) για την είσοδο στην αγορά των φωτοβολταϊκών ή τη διάδοση σε ευρεία κλίμακα.

Οι δύο πρώτες έρευνες που αναλύθηκαν σε αυτή την ενότητα αφορούσαν την οργανική ηλιακή κυψέλη. Η πρώτη βασίστηκε στην LCA ενός τυπικού οργανικού κυττάρου ετεροσύνδεσης (LT 15 ετών) σε εργαστηριακή κλίμακα κατασκευής. Η ανάλυση ήταν αρκετά περίπλοκη, λόγω του γεγονότος ότι οι συγγραφείς ανέλυσαν σε βάθος κάθε βήμα κατασκευής και τον κύκλο ζωής όλων των διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιούνται στα διάφορα στρώματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν για απόδοση μονάδας 5% (αποτελεσματικότητα για εργαστηριακά κύτταρα) και 10% (αναμενόμενη βιομηχανική απόδοση). Το υπολογισμένο EPBT ήταν τέσσερα και δύο χρόνια, οι συντελεστές εκπομπής CO₂ ήταν 109,94 g CO₂eq/kWhe και 54,92 g CO₂eq/kWhe, και το ERF ήταν 3,75 και 7,49, αντίστοιχα, για τις δύο τιμές απόδοσης. Η κατανάλωση PE για 1 m² αυτής της οργανικής ηλιακής μονάδας (90% ενεργή επιφάνεια) ήταν 2800 MJ. Περισσότερο από το 70% αναφέρθηκε στην άμεση ενέργεια διεργασίας (ιδίως την ενέργεια για τη συντήρηση της ατμόσφαιρας N₂), ενώ το 25% αποδόθηκε σε υλικά εισόδου ενσωματωμένων ενεργειακών κυττάρων (το οξείδιο του κασσιτέρου του ινδίου (ITO) και το άζωτο ήταν τα δύο κύρια hotspot) (Corcelli et al., 2019).

Στη δεύτερη μελέτη, οι ερευνητές μελέτησαν ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο μιας ένωσης, χρησιμοποιώντας διαφορετικά ενεργά στρώματα και διάφορους συνδυασμούς τυπικών υλικών δότη/δέκτη, εστιάζοντας ιδιαίτερα στο ρόλο του πολυμερούς (το υλικό δότη) και του φουλερενίου (μόριο δέκτη ηλεκτρονίων). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το EPBT κυμαινόταν από 0,3 έως 0,7 ενώ το PE κυμαινόταν από 4 έως 7 MJ/Wp, ανάλογα με τα απαιτούμενα ενεργά υλικά. Το BOS δεν

λήφθηκε υπόψη στους υπολογισμούς και δεν υπέθεσαν καμία υποβάθμιση της συσκευής. Ο συντελεστής υποβάθμισης είναι μια σημαντική πτυχή των μελετών OPV, επομένως αυτό μπορεί να προκαλέσει αύξηση του υπολογισμένου EPBT. Η επικάλυψη ITO/PET έδειξε σχετικά υψηλή ενσωματωμένη ενέργεια (63,45 MJ/m²) σε σύγκριση με τα άλλα συστατικά (επαφές αλουμινίου και ενθυλάκωση, 0,048 MJ/m² και 43,5 MJ/m² αντίστοιχα), ενώ η ενσωματωμένη ενέργεια των φουλλερενίων ήταν έντονα μεταβλητή (από 65 έως 495 GJ/kg ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής και τη δομή των φουλλερενίων). Η κύρια διαφορά μεταξύ των τεχνικών παραγωγής φουλλερενίου (πυρόλυση και πλάσμα) αποδίδεται στον ηλεκτρισμό και το αδρανές αέριο (αργό και ήλιο) που απαιτούνται για την τεχνική πλάσματος. Για το λόγο αυτό, οι συγγραφείς πρότειναν τη χρήση αυτής της τεχνικής σε περιοχές χαμηλού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας ή όπου υπάρχουν περιορισμοί που συνδέονται με τα υποπροϊόντα της καύσης από την τεχνική της πυρόλυσης.

Διάφορες έρευνες παράλληλα, αξιολόγησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του QD-PV λαμβάνοντας υπόψη τις φάσεις απόκτησης, κατασκευής και χρήσης πρώτων υλών. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων συγκρίθηκαν με βιβλιογραφικά δεδομένα διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών (κορδέλα mc-Si, sc-Si, CdTe, CIS, DSSC) και με άλλες πηγές ενέργειας όπως πηνίο, πετρέλαιο, λιγνίτης, φυσικό αέριο, ντίζελ, πυρηνική ενέργεια, αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια. Οι συγγραφείς υπολόγισαν για το QD-PV ένα EBPT (1,5 έτος), το GWP (5 g CO₂eq/kWh) και το CED (286 kWh_{eq}/m²). Το EBPT του QD-PV ήταν μικρότερο από τους άλλους τύπους PV εκτός από το CdTe, ενώ ήταν της ίδιας τάξης EPBT άνθρακα, φυσικού αερίου και πυρηνικής ενέργειας, χαμηλότερο από το EPBT του λιγνίτη και υψηλότερο από το EPBT της αιολικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά το GWP, λαμβάνοντας υπόψη μια εκτιμώμενη απόδοση 14%, οι μονάδες QD-PV είχαν χαμηλότερο GWP από όλους τους τύπους φωτοβολταϊκών, πηνίο, πετρέλαιο, λιγνίτη, φυσικό αέριο και ντίζελ, αλλά υψηλότερο από τις πυρηνικές, αιολικές και υδροηλεκτρικές πηγές ενέργειας. Επιπλέον, το QD-PV έδειξε τις χαμηλότερες εκπομπές SO_x (≈25mg SO_x/kWh) και NO_x (≈12 mg NO_x/kWh), με εξαίρεση την πυρηνική, την αιολική και την υδροηλεκτρική ενέργεια, ενώ οι εκπομπές βαρέων μετάλλων ήταν οι υψηλότερες σε σύγκριση με όλους τους άλλους τύπους φωτοβολταϊκών μονάδων, και οι χαμηλότερες σε σύγκριση με τις άλλες πηγές ενέργειας. Οι κύριοι συνεισφέροντες στις ενεργειακές απαιτήσεις των μονάδων QD-PV (συμπεριλαμβανομένου του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του BOS) ήταν η ενθυλάκωση και η προστασία των ηλιακών κυψελών (42%), καθώς και η παραγωγή ηλιακών κυψελών QD (33%) και BOS (21%). Συμπερασματικά, η διάθεση επικίνδυνων αποβλήτων, η παραγωγή ITO και αλουμινοχάρτου ήταν οι διαδικασίες που

συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό στις εκπομπές βαρέων μετάλλων για την παραγωγή κυττάρων QD (Mahmud et al., 2018).

Παράλληλα, ερευνητική ομάδα που εργάστηκε σε δύο διαφορετικές εργασίες, κατασκεύασε ένα LCA από εύκαμπτα πολυμερή ηλιακά κύτταρα που παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο roll-to-roll. Και οι δύο αξιολογήσεις βασίστηκαν σε προσέγγιση από την διαδικασία κατασκευής πρώτων υλών μέχρι τη διαδικασία λειτουργίας και στην ίδια λειτουργική μονάδα (1 m² επεξεργασμένης επιφάνειας). Στην πρώτη εργασία, η ανάλυση αφορούσε μια πλήρη διαδικασία roll-to-roll για την κατασκευή εύκαμπτων πολυμερών μονάδων ηλιακών κυψελών. Οι ερευνητές εξέτασαν μια οργανική απόδοση ηλιακής μονάδας 2% και 3%.

Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε όρους EPBT που ήταν 2,02 και 1,35 έτη, αντίστοιχα. Οι εκπομπές CO₂ ήταν 56,65 g CO₂eq/kWhe και 37,77 g CO₂eq/kWhe, ενώ το ενσωματωμένο CO₂ ήταν 15,49 kg CO₂eq. Η κατανάλωση PE 1 m² επεξεργασμένης επιφάνειας (ενεργό εμβαδόν 67%) ήταν 379 MJ, κατανεμημένη στην άμεση ενέργεια διεργασίας (77 MJ) και στην ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών εισόδου (302 MJ). Ο κύριος συνεισφέρων σε αυτήν την τιμή ήταν το ITO στο υπόστρωμα PET (87%). Οι ερευνητές έδειξαν επίσης πώς το EPBT και το ERF άλλαξαν με την αποτελεσματικότητα (από 1,25% σε 10%) και την ενεργό περιοχή (50%, 67%, 85%). Όταν η απόδοση αυξήθηκε από 1,25 σε 10, το EPBT μειώθηκε από 4,34 σε 0,54 έτη (ενεργή περιοχή 50%), από 3,24 σε 0,4 χρόνια (ενεργή περιοχή 67%) και από 2,55 σε 0,32 χρόνια (ενεργή περιοχή 85%). Με τον ίδιο τρόπο, το ERF αυξήθηκε από 3,36 σε 27,66 (ενεργός περιοχή 50%), από 4,63 σε 37,07 (ενεργός περιοχή 67%) και από 5,88 σε 47,03 (ενεργός περιοχή 85%). Το EPBT του οργανικού κυττάρου που παρήχθη με αυτή τη διαδικασία roll-to-roll ήταν σύμφωνο με το EPBT των ευαισθητοποιημένων σε χρωστικές μονάδες (0,74–2,1 έτη, απόδοση 10%) αλλά υψηλότερο από το εύκαμπτο OPV (0,19 έτη, απόδοση 5%) (Rodriguez-Garcia, 2021).

Στη δεύτερη εργασία, οι ερευνητές ανέλυσαν μια νέα διαδικασία που επιτρέπει την αντικατάσταση του ηλεκτροδίου ITO σε οργανικές μονάδες. Το κύριο πρόβλημα του ηλεκτροδίου ITO είναι το ίνδιο, ένα υλικό που θα μπορούσε να αποτελέσει σημείο συμφόρησης για το μέλλον της μεγάλης κλίμακας παραγωγής OPV. Τα σενάρια ανακύκλωσης και EoL εξαιρέθηκαν λόγω έλλειψης δεδομένων, ενώ το BOS δεν ελήφθη υπόψη. Τα αποτελέσματα έδειξαν EPBT 9,45 ετών (απόδοση 1%· ενεργός περιοχή 36,7%) αλλά μέσω της βελτιστοποίησης της απόδοσης εκτιμήθηκε ότι το EPBT θα μπορούσε να πέσει στα 0,94 έτη (απόδοση 10% και ενεργή περιοχή 36,7%).

Η συνολική ισοδύναμη κατανάλωση πολυαιθυλενίου ανά FU (1 m² επεξεργασμένης επιφάνειας) ήταν 486 MJ, όπου μόνο 55,6 MJ οφειλόταν στην άμεση ενέργεια διεργασίας (το κύριο σημείο αναφοράς ήταν το τυπωμένο ηλεκτρόδιο αργύρου και το στέγνωμα κατά την εναπόθεση). Η ενσωματωμένη ενέργεια στα υλικά ήταν δέκα φορές υψηλότερη από την ενέργεια άμεσης διεργασίας (430,37 MJ). Και πάλι, οι ερευνητές έδειξαν πώς το EPBT και το ERF άλλαξαν με δύο παραμέτρους (απόδοση και ενεργή περιοχή): όταν η απόδοση άλλαξε από 1% σε 10%, το ERF αυξήθηκε από 1,59 σε 15,88 (ενεργή περιοχή 36,7%), από 2,94 σε 28,24 (ενεργή περιοχή 68,1 %) και από 3,67 σε 36,7 (85% ενεργή περιοχή). Η EPBT μειώθηκε από 5,31 έτη σε 0,53 έτη (ενεργός περιοχή 68,1%) και από 4,09 έτη σε 0,41 έτη (ενεργός περιοχή 85%). Οι συντελεστές εκπομπής CO₂eq ήταν 137,68 g CO₂eq/kWhe (απόδοση 1%), 91,79 g CO₂eq/kWhe (3% απόδοση) και 55,07 g CO₂eq/kWhe (5% απόδοση), ενώ το ενσωματωμένο CO₂eq ήταν 20,66 kg CO₂eq (Luo et al., 2018).

Σε σχετική έρευνα οι ερευνητές ανέλυσαν διαφορετικές διαδικασίες και υλικό για το OPV. Ο κύριος σκοπός αυτής της LCA ήταν να συγκρίνει CED διαφορετικών τεχνολογιών OPV (μικρό μόνιο απλής σύνδεσης, πολυμερές PV) και να αξιολογήσει τον αντίκτυπο της χρήσης διαφορετικών συνθηκών επεξεργασίας (θερμικές επεξεργασίες, στρώματα διεπαφής, πολυμερές χαμηλής ζώνης, τύπος ετεροσύνδεσης). Η λειτουργική μονάδα που επιλέχθηκε ήταν η παραγωγή ισχύος 1 watt-peak (Wp). Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι τα φουλερένια ήταν τα πιο ενεργοβόρα συστατικά του OPV. Για το λόγο αυτό, τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα, που απαιτούσαν υψηλή ποσότητα μεγάλων φουλερενίων, είχαν κατά μέσο όρο υψηλό CED (4,5–5,8 MJ/Wp) σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες OPV. Οι διεργασίες και τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε μικρομοριακά ΦΒ είχαν πολύ χαμηλό αντίκτυπο στο CED, σε σύγκριση με το πολυμερές ΦΒ. Σε αυτήν την περίπτωση, τα άλλα στοιχεία του συστήματος ήταν ένα hotspot και το CED εξαρτιόταν αυστηρά από την απόδοση και τον τύπο του μικρού μορίου που χρησιμοποιήθηκε (το CED ήταν 3,6 MJ/Wp για απόδοση 5% και 5,9 MJ/Wp για απόδοση 3%). Όσον αφορά τις συσκευές πολλαπλών συνδέσεων, η μεγαλύτερη απόδοση (6,5%) δεν είχε αξιοσημείωτη συνέπεια στο CED/Wp που ήταν υψηλότερη, σε σύγκριση με το πολυμερές PV (απόδοση 5–6,1%) και ελαφρώς χαμηλότερη από τα μικρά μόρια PV με απόδοση 3%. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να εξηγηθεί μέσω της αύξησης της πολυπλοκότητας των συσκευών, καθώς και της ανάγκης πρόσθετων υλικών και διαδικασιών (Yang et al., 2015).

Παράλληλα έγινε και μια σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων DSSC, εστιάζοντας στη φάση κατασκευής. Αναλύθηκαν οι ακόλουθες διαμορφώσεις (υπόστρωμα/ηλεκτρολύτης/μετρητή ηλεκτρόδιο/υπόστρωμα): γυαλί/υγρό ηλεκτρολύτη (LE)/ άνθρακας, γυαλί/ιονικός υγρός ηλεκτρολύτης (ILE)/θειούχο κοβάλτιο (CoS) PET, PET/LE/Pt PET, PET /LE/Pt γυαλί, χάλυβας/LE/Pt PET, χάλυβας/LE/Pt γυαλί, γυαλί/ILE/Pt γυαλί, γυαλί/LE/Pt γυαλί. Τα αποτελέσματα

έδειξαν ότι η αντικατάσταση του γυαλιού με PET μείωσε την περιβαλλοντική επιβάρυνση σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων (CC, HTP, LO, NLT, PM, FD). η χρήση χάλυβα (για την πίσω επαφή ηλιακής κυψέλης) ήταν ο κύριος συντελεστής στις περισσότερες κατηγορίες, ειδικά FD και CC (HH). Οι συγγραφείς εκτίμησαν επίσης ότι η αντικατάσταση της καθόδου πλατίνας με ένα CoS συνέβαλε σε χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τέλος, οι συγγραφείς υπολόγισαν το GWP100 και το CED. Οι δείκτες αυτοί ακολούθησαν την ίδια τάση των προηγούμενων αποτελεσμάτων. Στην πραγματικότητα, η διαμόρφωση με γυαλί χάλυβα-LE-Pt ήταν η χειρότερη για GWP100 (1,1 kg CO₂eq) και CED (43 GJ) ενώ το PET-LE-Pt PET είχε τις χαμηλότερες τιμές (GWP100 ήταν 0,2–0,3 kg CO₂eq και CED ήταν 10 GJ).

Η LCA έρευνα εφαρμόστηκε και σε ένα υβριδικό ηλιακό κύτταρο βασισμένο σε QD υπό ανάπτυξη. Η μελέτη βασίστηκε σε παραγωγή εργαστηριακής κλίμακας. Οι συγγραφείς συνέκριναν αυτό το ηλιακό κύτταρο με το προηγούμενο λεπτό φιλμ μέσω των αποτελεσμάτων κριτηρίων βιωσιμότητας (EPBT, εκπομπές GHG και NER), υποθέτοντας απόδοση 10% και LT 25 ετών. Δεν εξέτασαν το EoL και την ανακύκλωση λόγω έλλειψης δεδομένων. Το υπολογισμένο EPBT ήταν λιγότερο από το μισό από την κρυσταλλική τεχνολογία (1,51 έτη). Επιπλέον, το CO₂eq/kWh ήταν χαμηλότερο (2,89 g CO₂eq/kWh). Το NER ήταν 20,82 για υβριδικό ηλιακό στοιχείο με βάση QD (τύπος μείγματος) και 16,66 για υβριδικό ηλιακό στοιχείο με βάση QD (τύπος παραλλαγής). Στο τέλος της εργασίας, οι συγγραφείς διεξήγαγαν μια ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με το NER και το CO₂eq/kWh, μεταβάλλοντας το LT (από 1 έως 10 χρόνια) και την απόδοση (από 1% έως 10%). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι απαιτούνται διάρκειες ζωής μεγαλύτερες από ένα έτος και απόδοση μεγαλύτερη από 1% προκειμένου αυτά τα συστήματα να έχουν λιγότερο αντίκτυπο από ενεργειακή και περιβαλλοντική άποψη (Corcelli et al., 2019).

Οι ερευνητές αξιολόγησαν τις επιπτώσεις που σχετίζονται με ένα οργανικό ηλιακό κύτταρο και συνέκριναν την αρχιτεκτονική αυτού του συστήματος με μια απλούστερη ευέλικτη μεμονωμένη συσκευή. Βρήκαν ότι μια συσκευή σε δίκτυο είχε απόδοση περίπου 20% καλύτερα από την απλή. Οι συγγραφείς εξέτασαν τρεις διαφορετικές αποδόσεις (1%, 3% και 5%) και αξιολόγησαν ένα EPBT από 0,24 έως 0,3 έτη και ένα CED από 43,86 έως 51,34 MJEPe/m². Οι κατηγορίες μεσαίου σημείου που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο CML2001 ήταν οι ADP, AP, EP, GWP100, ODP, TETP και POx. Τα περιβαλλοντικά hotspot ήταν το ασήμι, το PET και η ηλεκτρική ενέργεια. Ο Silver ήταν ένας από τους κύριους μοχλούς των ADP, EP και TETP, ακολουθούμενος από το PET και το μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας. Το CED για το PET και την ηλεκτρική ενέργεια ήταν 16,5 MJ και 14 MJ, αντίστοιχα. Ομάδα ερευνητών μελέτησε την εξέλιξη των ευαισθητοποιημένων κυψελών από το πρωτότυπο Gratzel σε πολυτελή ηλιακή εφαρμογή. Το αξιολογημένο σύστημα τοποθετήθηκε στην

ταράτσα και η βασική απόδοση που εξετάστηκε ήταν 8%. Οι επιδόσεις του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίστηκαν για διαφορετικές ακτινοβολίες (που αντιστοιχούν σε Nord, Centre και South Europe) με προσέγγιση από βάση έως πύλη, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσης των κύριων εξαρτημάτων, της κατασκευής της μονάδας και της φάσης λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια της μελέτης, υπολογίστηκαν 17 δείκτες κρούσης και δείκτης CED για τρεις διαφορετικούς τύπους χρωστικών: τη χρωστική πορφυρίνης YD2-o-C8, τη βαφή με βάση το ρουθίνιο N719 και τη βαφή D5 χωρίς οργανικά μέταλλα. Οι υπολογισμένες μέσες τιμές της CED ήταν 224,4 MJ (για τη χρωστική YD2-o-C8), 111,2 MJ (για τη βαφή D5) και 61,8 MJ (για τη βαφή N719). Οι δείκτες απλής βαθμολογίας ήταν 2,08 βαθμοί (για τη βαφή YD2-o-C8), 0,81 βαθμοί (για τη βαφή D5) και 1,07 (για τη βαφή N719). Ο σημαντικότερος αντίκτυπος οφειλόταν στα υλικά στήριξης της μονάδας, τα οποία μπορούσαν να μειωθούν κατά περίπου 35% αλλάζοντας από γυαλί σε πολυμερές υπόστρωμα (Rodriguez-Garcia, 2021).

Μια μελέτη ενός συστήματος DSSC συνδεδεμένου με πλέγμα ταράτσας διεξήχθη χωρίς να υπολογιστεί η φάση ανακύκλωσης. Το κύριο αντικείμενο της μελέτης ήταν η αξιολόγηση των δεικτών NER, GWP100 και EPBT. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν μια προσέγγιση από την κατασκευή των πρώτων υλών μέχρι τη λειτουργία του πλέγματος και εξέτασαν την απόδοση 8%. Τα αποτελέσματα έδειξαν NER 12,67 (θεωρώντας LT 20 ετών), EPBT 1,58 ετών και GWP100 22,29 CO₂eq/kWh. Διεξήχθη ανάλυση ευαισθησίας και για αυτές τις τρεις παραμέτρους. Το EPBT κυμαινόταν από 2,11 έτη έως 0,97 έτη (με απόδοση που κυμαινόταν από 6% έως 13%). Η ελάχιστη τιμή NER ήταν 7,30 (απόδοση 6%, LT 15 έτη), ενώ η μέγιστη τιμή ήταν 29,41 (απόδοση 13%, LT 30 έτη). Με τον ίδιο τρόπο, οι αντίστοιχες τιμές για το GWP100 ήταν 38,68 CO₂eq/kWh και 9,60 CO₂eq/kWh. Τα hotspots για τους δέκα περιβαλλοντικούς δείκτες (ADP, AP, EP, GWP100, ODP, HTP, FAEP, MAEP, TE και POx) ήταν η κατασκευή μονοκύτταρων (από 37% σε 80%) και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (20% έως 45%).

Ομάδα ερευνητών εξέτασε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις δύο διαφορετικών ηλιακών πλαισίων OPV: μια προεπιλεγμένη τεχνολογία OPV (OPV-D) με χύδην ετεροσύνδεση βασισμένη σε πολυμερές με παράγωγο φουλερενίου και ένα πολυμερές στο στρώμα του και μια δεύτερη τεχνολογία εξ ολοκλήρου πολυμερούς (OPV-PP), δέκτης πολυμερούς-δότης πολυμερούς. Οι συγγραφείς ήθελαν να εξετάσουν πώς οι διαφορετικές ενοποιήσεις παραγωγής, η διάρκεια χρήσης και οι οδοί απόρριψης επηρέαζαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων OPV. Για το λόγο αυτό, εξέτασαν δύο σενάρια συστήματος, μια ηλιακή συστοιχία στέγης (S1) και έναν φορητό ηλιακό φορτιστή (S2) και δύο διαφορετικά σενάρια EoL, δηλαδή την υγειονομική ταφή και την αποτέφρωση. Στη συνέχεια,

συνέκριναν τα αποτελέσματα με τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πυριτίου: συγκεκριμένα, OPV (D και PP) με mc-Si στο σενάριο S1 και OPV (D και PP) με a-Si στο σενάριο S2 (Rao et al., 2022).

Στο S1 και στο S2, και για τα δύο σενάρια EoL, τα OPV-D και OPV-PP έδειξαν καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα mc-Si και a-Si. Τέλος, μια τελευταία σύγκριση, σχετικά με τις σχετικές επιπτώσεις στον κύκλο ζωής, έγινε μεταξύ OPV-D (S1 και S2) και m-Si. Στο S1, οι επιπτώσεις OPV-D (αποτέφρωση) κυμαίνονταν από 97% χαμηλότερες για το TETP έως 32% χαμηλότερες για το ΑΕ. η μόνη εξαίρεση ήταν η MD που ήταν 21% υψηλότερη για το OPV-D. στο S2, οι επιπτώσεις OPV-D κυμαίνονταν από 89% χαμηλότερες για το αστικό LO έως 39% χαμηλότερο για το TETP. Ερευνητική ομάδα πραγματοποίησε LCA μελέτη από το εργαστήριο έως την εγκατάσταση και λειτουργία για διαφορετικές δομές PSC κατάλληλες για κατασκευή χαμηλού κόστους (διάλυμα, κενό και χωρίς HTL). Θεώρησαν απόδοση 15% (καλύτερη απόδοση 15,6%). Το EPBT για αυτό το σύστημα ήταν 1–1,5 έτη, ενώ το GWP κυμαινόταν από 100 έως 150 g CO₂eq/kWh. Επιπλέον, υπολογίστηκαν εννέα κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεσαίου σημείου με τη μέθοδο TRACI (Corcelli et al., 2019).

Για όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, εκτός από τις Ex και ME, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά την κατασκευή ήταν ένα σημαντικό σημείο (50–90%). Ειδικότερα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έφτασε το 80% για χρήση GWP, HTP, PED και FW. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με ορισμένες συσκευές πρώτης και δεύτερης γενιάς: οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (όταν όλες οι κατηγορίες επιπτώσεων κανονικοποιήθηκαν σε sc-Si) των συσκευών περοβσκίτη ήταν υψηλότερες (διάλυμα και κενό) ή παρόμοιες (χωρίς HTL) με το mc-Si ηλιακά κύτταρα, χαμηλότερα από τα ηλιακά κύτταρα sc-Si και αρκετά υψηλότερα από τα ηλιακά κύτταρα a-Si, CdTe και CIS. Όσον αφορά τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, η PSC είχε υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις από όλες τις άλλες τεχνολογίες. Αυτό το αποτέλεσμα πιθανότατα επηρεάστηκε από την έλλειψη δεδομένων για την παραγωγή κυψελών περοβσκίτη μεγάλης κλίμακας, και ως εκ τούτου θα μπορούσε να αλλάξει στο μέλλον (το ίδιο θα πρέπει να συμβεί και για τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις).

Έρευνα περιέγραψε μια ανάλυση LCA και οικολογικής απόδοσης μελλοντικών διαδοχικών μονάδων OPV (χρησιμοποιούνται νέα υλικά όπως οξείδιο ψευδαργύρου νανομεγέθους, ασήμι νανομεγέθους και πολυμερές ημιαγωγών, διαχείριση φωτός και νέα εύκαμπτη ενθυλάκωση με βάση το PET με οργανική και ανόργανα εμπόδια). Οι ερευνητές εξέτασαν μια απόδοση μετατροπής ισχύος 8% με σενάρια LT 15 και 20 ετών. Ο στόχος του LCA ήταν να υπολογίσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτού του πρωτότυπου OPV, του EPBT και του GWP για την παραγόμενη ηλεκτρική

ενέργεια, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς τύπους μονάδων (εγκατεστημένα στην οροφή) ως σημείο αναφοράς (mc-Si και CdTe). Τα αποτελέσματα για το OPV έδειξαν ότι το CED ήταν 108–112 MJeq/m², το GWP ήταν 5,7–6 kg CO₂eq/m², το MD ήταν 0,046–0,056 \$/m² ενώ το Ex ήταν 5,3–6,7 CTU/m². Η μονάδα OPV είχε EPBT 1,6 και 2,5 μήνες όταν εκτέθηκε σε τιμή ακτινοβολίας της Νότιας Ευρώπης (Rao et al., 2022).

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τα CED, Ex, MD και EPBT των CdTe και m-Si, προέκυψε ότι 1 m² μονάδας OPV αντιπροσώπευε μόνο το 3–10% του 1 m² μονάδων CdTe και mc-Si αντίστοιχα. Το EPBT του OPV (εγκατεστημένο στην πρόσοψη) ήταν 18–55% αυτού των σημείων αναφοράς και το GWP ήταν 12–60% αυτού των σημείων αναφοράς. Ένας από τους περισσότερους συνεισφέροντες στο CED του OPV ήταν η ενθυλάκωση (20%), ακολουθούμενη από το πολυμερές PEDOT:PSS (19%) και τη διαχείριση φωτός (13%). Συμπεριλαμβανομένου ολόκληρου του συστήματος (ενότητα και BOS), το EPBT του OPV προστέθηκε σε 3,4 και 4,7 μήνες. Λαμβάνοντας υπόψη ένα αισιόδοξο σενάριο απόδοσης για το OPV (10% απόδοση μετατροπής ισχύος), το GWP μειώθηκε κατά 20% (15 έτη LT) και κατά 19,7% (20 έτη LT) για ακτινοβολία 1000–1200 kWh/m²y, ενώ μειώθηκε κατά 20% (15 έτη LT) και 19% (20 έτη LT) για ακτινοβολία 1800–2000 kWh/m²y (Luo et al., 2018).

Σε άλλη έρευνα έγινε μια σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής διαφορετικών συστημάτων PSC. Η μελέτη επικεντρώθηκε στις κρούσεις πέντε τυπικών ηλιακών κυψελών περοβσκήτη, που αναπτύχθηκαν με διαφορετικά υλικά και διαδικασίες κατασκευής και συγκεκριμένα: MASnI₃, MAPbI₃, FAPbI₃, CsPbBr₃ και MAPbI₂Cl. Το 95% της ενσωματωμένης ενέργειας προήλθε από την κατασκευή συστημάτων σε κάθε σύστημα ηλιακών κυψελών. Οι συγγραφείς επέλεξαν εννέα διαφορετικές περιβαλλοντικές κατηγορίες για να αξιολογήσουν τις επιδόσεις κάθε PSC. Ακολουθώντας την προηγούμενη σειρά (MASnI₃, MAPbI₃, FAPbI₃, CsPbBr₃, MAPbI₂Cl): το ADP ήταν $1,32 \times 10^{-5}$, $1,28 \times 10^{-5}$, $8,11 \times 10^{-6}$, $7,13 \times 10^{-6}$, $7,13 \times 10^{-6}$ ενώ το GWP ήταν 49,4, 67,2, 63,1, 41,6 και 49,5 g CO₂eq. Άλλα αποτελέσματα δεν εκφράστηκαν σε απόλυτη τιμή αλλά μόνο σε κανονικοποιημένη γραφική μορφή. ούτως ή άλλως, προέκυψε ότι οι διαφορετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προέκυψαν μπορεί να αποδοθούν στις ποσότητες οργανικών διαλυτών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των συσκευών και στις διαφορετικές τιμές απόδοσης.

Λαμβάνοντας υπόψη την κατασκευή 1 cm² κυψέλης ως FU, τα MAPbI₃ και FAPbI₃ είχαν τις υψηλότερες επιπτώσεις, εκτός από το ADP. Αντίθετα, λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή 1 kWh ως FU, MASnI₃ και CsPbBr₃ είχαν τις υψηλότερες επιπτώσεις σε όλες τις κατηγορίες. Αυτή η διαφορά αποδόθηκε στη χαμηλή απόδοση μετατροπής ισχύος αυτών των κυψελών (μόνο 5,73% και

4,88%) σε σύγκριση με άλλες κυψέλες (20% για το MAPbI₃, 15,56% για το FAPbI₃, 10,9% για το MAPbI₂Cl). Η παραγωγή CO₂eq (GWP) που συνδέεται με την παραγωγή 1 kWh (FU) ηλεκτρικής ενέργειας ήταν μεταξύ 2,63 και 6,78 kg CO₂eq, ακολουθώντας μια αντίστροφη τάση από αυτή της απόδοσης κάθε κυψέλης. Επιπλέον, η παραγωγή χρυσού είχε τη μεγαλύτερη συνεισφορά στα φωτοβολταϊκά συστήματα, επομένως η αντικατάσταση αυτού του υλικού (με ασήμι ή αλουμίνιο) θα μπορούσε να μειώσει τη συνολική εικόνα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Ερευνητική ομάδα μελέτησε διαφορετικές διαδοχικές δομές περοβσκίτη/πυριτίου (Si) και τις συνέκρινε με τρεις διαφορετικές μονές συνδέσεις PSC (Ag-Au-Al ως πίσω ηλεκτρόδια), ένα sc-Si και ένα HIT Si κύτταρα. Πραγματοποίησαν μια LCA για να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις GWP, HTP, AE, FAEP, ADP και το EPBT που σχετίζεται με τα τρία διαδοχικά κύτταρα περοβσκίτη. Οι διαφορές μεταξύ αυτών των κυττάρων ήταν στα υλικά και στις δομές. Οι δύο πρώτες κυψέλες χρησιμοποίησαν την ίδια ηλιακή κυψέλη HIT Si για το κάτω υποκελί και την ίδια δομή περοβσκίτη για την επάνω υποκυψέλη (απόδοση 20%). Η τρίτη διαδοχική δομή χρησιμοποίησε ένα πιο κοινό χαμηλότερο κόστος ηλιακής κυψέλης πυριτίου με σύνδεση p-n (απόδοση 16%). Όλα τα ακόλουθα αποτελέσματα για τη σειρά PSC/Si υπολογίστηκαν σε ένα σενάριο (20 χρόνια) όπου το ηλιακό στρώμα περοβσκίτη έγινε αδιαφανές μετά από 1 χρόνο LT, καθιστώντας αδύνατη την παραγωγή ενέργειας από το κάτω Si. Αντίστοιχα, υποτέθηκε η υποκατάσταση υλικών με στρώμα περοβσκίτη κάθε χρόνο.

Για ένα διαφορετικό σενάριο, το πιο αισιόδοξο για τη ζωή του περοβσκίτη, το στρώμα παρέμεινε ηλεκτρικά αγωγίμο μετά από ένα χρόνο και δεν απαιτήθηκε αντικατάσταση: σε αυτήν την περίπτωση, όλες οι κατηγορίες επιπτώσεων που σχετίζονται με τη σειρά PSC/Si, εκτός από το HTP (μη καρκινικό φαινόμενο), προέκυψαν με την ίδια σειρά ή χαμηλότερη από αυτή του HIT Si. Το EPBT για τη διασταύρωση Si p-n ήταν 1,6 χρόνια, ενώ για το Si HIT ήταν δύο χρόνια. Το EPBT για την ηλιακή κυψέλη περοβσκίτη και περοβσκίτη/Si διαδοχική ηλιακή κυψέλη ήταν χαμηλότερη (1,3–1,5 έτη), σε σύγκριση με τις δύο κυψέλες πυριτίου.

Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα-Συζήτηση

Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας έδειξε μια μεγάλη παρουσία μελετών LCA που εφαρμόζονται σε φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα, ιδίως σχετικά με τεχνολογίες τρίτης γενιάς. Προέκυψε πώς οι βασικές πτυχές, όπως η απόδοση, η γεωγραφική θέση, ο τύπος των φωτοβολταϊκών κυψελών, η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή, η ανάλυση των βοηθητικών εξαρτημάτων, η φάση EoL (λαμβάνοντας υπόψη την ανακύκλωση υλικών και εξαρτημάτων), μαζί με τις διαφορετικές μεθοδολογικές πτυχές που επιλέγονται από τους αναλυτές LCA επηρεάζουν τα αποτελέσματα των διαφόρων μελετών. Επιπλέον, η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι, ακόμη και όταν εξετάζονται παρόμοιες ενότητες, είναι δύσκολο να συγκριθούν διαφορετικές μελέτες, καθώς οι αναλυτές LCA μπορούν να επιλέξουν διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης.

Επιπλέον, άλλοι παράγοντες (όπως οι διαφορετικές διαμορφώσεις των μονάδων, οι εγκαταστάσεις και η απόδοση κ.λπ.) καθιστούν ακόμη πιο περίπλοκη τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Πάντως, ήταν δυνατό να προσδιοριστεί ποια είναι τα κοινά σημεία ενδιαφέροντος που σχετίζονται με περιβαλλοντικούς δείκτες ή με μια συγκεκριμένη διαδικασία και φάση του κύκλου ζωής. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είχε μεγάλο αντίκτυπο στις περισσότερες κατηγορίες και για όλες τις γενιές, επομένως είναι σημαντικό να δρομολογηθεί μία στόχευση σε όσο το δυνατόν λιγότερο ενεργοβόρες διαδικασίες παραγωγής ή να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις με την αξιοποίηση ενός μίγματος ενεργειακής παρασκευής που δεν βασίζεται κυρίως σε ορυκτά καύσιμα.

Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς, η συγκεκριμένη συμβολή στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στην κατασκευή και επεξεργασία των mc-Si και sc-Si, οι οποίες καταλήγουν να είναι ενεργοβόρες διεργασίες. Για τη δεύτερη και την τρίτη γενιά, οι διαδικασίες παραγωγής απαιτούν λιγότερη ενέργεια από την επεξεργασία πυριτίου και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, χαμηλότερες σε σύγκριση με την πρώτη γενιά. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη περιθώρια βελτίωσης όσον αφορά τις τεχνικές παραγωγής που χρησιμοποιούνται, όσον αφορά τους χρόνους εναπόθεσης, στρώσης και τη θερμοκρασία, το

στάδιο της ενθυλάκωσης κ.λπ., όπως για παράδειγμα, η χρήση υλικών που έχουν μεγάλη ενσωματωμένη ενέργεια όπως ΙΤΟ, που καλύπτονται (OPV και QD), η χρήση ουσιών που έχουν ιδιαίτερη κρίσιμη σημασία όσον αφορά τις εκπομπές βαρέων μετάλλων στο νερό και το έδαφος (QD και περοβσκίτης) ή τη σταθερότητα ορισμένων ηλεκτρολυτών σε χαμηλές θερμοκρασίες (DSSC).

Μια άλλη μη αμελητέα πτυχή των αναδυόμενων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών συνδέεται με τη χρήση πολύτιμων υλικών (χρυσός, ασήμι, χαλκός και πλατίνα) ή δυνητικά τοξικών στοιχείων. Σε αυτήν την περίπτωση, αν και τα αποτελέσματα των αναλύσεων LCA είναι συχνά καλύτερα σε περιβαλλοντικό επίπεδο σε σύγκριση με ώριμες τεχνολογίες (π.χ. φωτοβολταϊκά με βάση Si), είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η πραγματική βιωσιμότητα ενός σεναρίου μεγάλης κλίμακας διάχυσης αυτών των συσκευών. Πρώτα απ' όλα, πρέπει να υπολογιστεί η έλλειψη επαρκών πρώτων υλών και η απουσία έγκυρων εναλλακτικών λύσεων για τη διατήρηση ή τη βελτίωση των επιδόσεων, εάν χρησιμοποιούνται σπάνια ή πολύτιμα υλικά. Δεύτερον, προκύπτει η ανάγκη να αξιολογηθούν σε βάθος οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της απελευθέρωσης νέων υλικών ή τοξικών στοιχείων (όπως το κάδμιο) στους χώρους υγειονομικής ταφής (εάν δεν αναμένεται να ανακτηθούν). Τέλος, προκύπτει και ένα ζήτημα που αφορά την σημασία της επέκτασης των σεναρίων κινδύνου, της αξιολόγησης των συνεπειών (προς το παρόν δεν εξετάζονται ευρέως) συμβάντων και ατυχημάτων, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν φωτιά στις μονάδες και την πιθανή απελευθέρωση θραυσμάτων στο περιβάλλον.

Στην πραγματικότητα, η μεγάλη πρόκληση σχετικά με τις νέες συσκευές είναι η βελτίωση της απόδοσης, της ωφέλιμης ζωής και των διαδικασιών παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τον αντίκτυπο της πιθανής μεγάλης κλίμακας εμπορευματοποίησής τους. Πράγματι, όπως προέκυψε από τις αναλύσεις που έγιναν σε διάφορες μελέτες, η αύξηση της απόδοσης είναι μια από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας και των πραγματικών επιπτώσεων που θα έχουν στο μέλλον τα ηλιακά κύτταρα επόμενης γενιάς. Το ίδιο ισχύει και για την παράμετρο LT, η οποία επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης υλικών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τη χρήση τους. Επιπλέον, επιτρέπει την απόσβεση του ενεργειακού κόστους του κύκλου ζωής των συσκευών, καθώς μπορούν να παράγουν περισσότερη ενέργεια με την πάροδο του χρόνου. Στο πλαίσιο αυτό, η έρευνα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάλυση διαφορετικών διαμορφώσεων (αξιολόγηση της διαθεσιμότητας, του κόστους και της ποιότητας των χρησιμοποιούμενων υλικών) και σε εναλλακτικές διαδικασίες παραγωγής, επισημαίνοντας ποιες είναι κρίσιμες πτυχές κάθε τεχνολογίας σε σχέση με τις διάφορες περιβαλλοντικές κατηγορίες.

Για όλους αυτούς τους λόγους που προηγουμένως εκτέθηκαν, η ανακύκλωση υλικών και, σε ορισμένες περιπτώσεις, η ενέργεια που λαμβάνεται από την καύση ορισμένων στοιχείων, επιτρέπει την απόσβεση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων σε σύγκριση με το σενάριο της απλής υγειονομικής ταφής. Σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί αυτή η πτυχή κατά περίπτωση και να εξεταστεί ο αντίκτυπος της μεταφοράς στους χώρους επεξεργασίας και η ενέργεια που απαιτείται για τον διαχωρισμό των υλικών που αποστέλλονται στην ανακύκλωση, που θα μπορούσαν να αυξηθούν με την πολυπλοκότητα των συσκευών.

Μια τελευταία ανάλυση πρέπει να γίνει για το EPBT, έναν επαναλαμβανόμενο δείκτη απόσβεσης ενέργειας στο LCA των φωτοβολταϊκών, που είναι ενδεικτικό της βιωσιμότητας του συστήματος από ενεργειακή άποψη: η τάση που προκύπτει από αυτήν την ανασκόπηση είναι ότι η παράμετρος EPBT είναι χαμηλότερη όσο αυξάνεται η τεχνολογία. Έτσι γενικά, η πρώτη γενιά εμφανίζει σχετικά υψηλό EPBT (πάνω από δύο χρόνια), ενώ η τρίτη γενιά EPBT είναι χαμηλότερη από δύο χρόνια, ειδικά αν ληφθεί υπόψη η βελτίωση της απόδοσης, όπου συχνά πέφτει ακόμη και κάτω από ένα έτος. Ωστόσο, αυτή η πτυχή δεν αφορά τις εκπομπές CO₂ και το CED. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι καλύτερες τεχνολογίες φαίνεται να είναι αυτές της δεύτερης γενιάς, οι οποίες διασφαλίζουν έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ της αποτελεσματικότητας και της ωριμότητας των διαδικασιών παραγωγής. Υπό αυτή την έννοια, οι μελλοντικές αναλύσεις θα μπορούσαν να παρέχουν περισσότερες ενδείξεις, όταν οι νέες τεχνολογίες θα φτάσουν σε μεγαλύτερη σταθερότητα όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση και τη διάρκεια ζωής.

Βέβαια, αναμένεται ότι οι συντελεστές εκπομπών και η τιμές των μονάδων θα αλλάξουν στο μέλλον. Βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης του κύκλου ζωής θα μπορούσε να επιτευχθεί χάρη στη βελτίωση της απόδοσης στη φάση χρήσης, τις τεχνολογικές καινοτομίες, την ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα των διαδικασιών παραγωγής και των υλικών που χρησιμοποιούνται. Η δυναμική AKZ και οι επακόλουθες μελέτες AKZ θα είναι χρήσιμες για την αξιολόγηση της αλλαγής στους παράγοντες και το κόστος εκπομπών.

Τέλος, από αυτή την επισκόπηση, προκύπτει η ανάγκη να διερευνηθούν οι λόγοι για τις επιλογές που έγιναν και η σημασία της ποιότητας και της προέλευσης των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, τα οποία συχνά παραλείπονται. Δεδομένου ότι πολλές μελέτες βασίζονται σε δευτερογενή δεδομένα που λαμβάνονται από προηγούμενες αναλύσεις, αυτό βοηθά στον εντοπισμό των επαναλαμβανόμενων φαινομένων και οδηγεί σε λιγότερη αβεβαιότητα ως προς τα αποτελέσματα. Επιπλέον, είναι σαφώς σημαντικό η χρήση διαφορετικών μεθόδων περιβαλλοντικής αξιολόγησης και οι εφαρμογές ποικίλων αναλύσεων να επιτρέπουν την αξιολόγηση της επίδρασης

ορισμένων παραμέτρων στα αποτελέσματα και να διευκολύνουν περαιτέρω τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μελετών, οι οποίες γενικά διαφέρουν σε διάφορες πτυχές που σχετίζονται με την επιλογές του αναλυτή και στην ιδιαιτερότητα του αντικειμένου της μελέτης.

Βιβλιογραφία

Akinyele, D. O., Rayudu, R. K., & Nair, N. K. C. (2017). Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria. *Renewable Energy*, *101*, 537-549.

Al-Janahi, S. A., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Environmental Impact Associated with the Performance of Building Integrated Photovoltaics: Life-Cycle Assessment Perspective. In *Energy Systems Evaluation (Volume 1)* (pp. 203-225). Springer, Cham.

Baharwani, V., Meena, N., Dubey, A., Sharma, D., Brighu, U., & Mathur, J. (2014, March). Life cycle inventory and assessment of different solar photovoltaic systems. In *2014 Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy* (pp. 1-5). IEEE.

Blanco, C. F., Cucurachi, S., Guinée, J. B., Vijver, M. G., Peijnenburg, W. J., Trattnig, R., & Heijungs, R. (2020). Assessing the sustainability of emerging technologies: A probabilistic LCA method applied to advanced photovoltaics. *Journal of Cleaner Production*, *259*, 120968.

Bracquene, E., Peeters, J. R., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2018). Taking evolution into account in a parametric LCA model for PV panels. *Procedia Cirp*, *69*, 389-394.

Carnevale, E., Lombardi, L., & Zanchi, L. (2014). Life Cycle Assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale. *Energy*, *77*, 434-446.

Constantino, G., Freitas, M., Fidelis, N., & Pereira, M. G. (2018). Adoption of photovoltaic systems along a sure path: A life-cycle assessment (LCA) study applied to the analysis of GHG emission impacts. *Energies*, *11*(10), 2806.

Corcelli, F., Fiorentino, G., Petit-Boix, A., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2019). Transforming rooftops into productive urban spaces in the Mediterranean. An LCA comparison of agri-urban production and photovoltaic energy generation. *Resources, conservation and recycling*, *144*, 321-336.

Fthenakis, V., & Leccisi, E. (2021, June). Life-Cycle Analysis of Tandem PV Perovskite-Modules and Systems. In *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 1478-1485). IEEE.

- Fthenakis, V., & Raugei, M. (2017). Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems. In *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems* (pp. 209-232). Woodhead Publishing.
- Fu, Y., Liu, X., & Yuan, Z. (2015). Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production*, 86, 180-190.
- Fukurozaki, S. H., Zilles, R., & Sauer, I. L. (2013). Energy payback time and CO₂ emissions of 1.2 kWp photovoltaic roof-top system in Brazil. *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, 2(2), 1-6.
- Hong, J., Chen, W., Qi, C., Ye, L., & Xu, C. (2016). Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. *Solar Energy*, 133, 283-293.
- Hosseini-Fashami, F., Motevali, A., Nabavi-Pelesaraei, A., Hashemi, S. J., & Chau, K. W. (2019). Energy-Life cycle assessment on applying solar technologies for greenhouse strawberry production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109411.
- Hou, G., Sun, H., Jiang, Z., Pan, Z., Wang, Y., Zhang, X., ... & Yao, Q. (2016). Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. *Applied Energy*, 164, 882-890.
- Huang, B., Zhao, J., Chai, J., Xue, B., Zhao, F., & Wang, X. (2017). Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Solar Energy*, 143, 132-141.
- Kim, B. J., Lee, J. Y., Kim, K. H., & Hur, T. (2014). Evaluation of the environmental performance of sc-Si and mc-Si PV systems in Korea. *Solar Energy*, 99, 100-114.
- Krebs-Moberg, M., Pitz, M., Dorsette, T. L., & Gheewala, S. H. (2021). Third generation of photovoltaic panels: A life cycle assessment. *Renewable Energy*, 164, 556-565.
- Kumar, N. M., Chopra, S. S., & Rajput, P. (2020). Life cycle assessment and environmental impacts of solar PV systems. In *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (pp. 391-411). Academic Press.
- Laleman, R., Albrecht, J., & Dewulf, J. (2011). Life cycle analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 267-281.

- Latunussa, C. E., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mancini, L. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar energy materials and solar cells*, 156, 101-111.
- Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Teridi, M. A. M., Sepeai, S., ... & Sopian, K. (2018). Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 11-28.
- Luo, W., Khoo, Y. S., Kumar, A., Low, J. S. C., Li, Y., Tan, Y. S., ... & Ramakrishna, S. (2018). A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 157-162.
- Mahmud, M. P., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2018). Environmental impacts of solar-photovoltaic and solar-thermal systems with life-cycle assessment. *Energies*, 11(9), 2346.
- Müller, A., Friedrich, L., Reichel, C., Hecceg, S., Mittag, M., & Neuhaus, D. H. (2021). A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory. *Solar energy Materials and Solar Cells*, 230, 111277.
- Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M. L. (2020). Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. *Energies*, 13(1), 252.
- Parisi, M. L., Maranghi, S., & Basosi, R. (2014). The evolution of the dye sensitized solar cells from Grätzel prototype to up-scaled solar applications: A life cycle assessment approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 124-138.
- Piasecka, I., Bałdowska-Witos, P., Piotrowska, K., & Tomporowski, A. (2020). Eco-energetical life cycle assessment of materials and components of photovoltaic power plant. *Energies*, 13(6), 1385.
- Rao, V. T., & Sekhar, Y. R. (2022). Comparative analysis on embodied energy and CO2 emissions for stand-alone crystalline silicon photovoltaic thermal (PVT) systems for tropical climatic regions of India. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103650.
- Rawat, B. S., Negi, P., Pant, P. C., & Joshi, G. C. (2018). Evaluation of energy yield ratio (EYR), energy payback period (EPBP) and GHG-emission mitigation of solar home lighting PV-systems of 37Wp modules in India. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 8(1), 459-465.

- Rodriguez-Garcia, G., Fu, H. C., Sullivan, P., Chen, C. J., Song, Z., Chen, J., ... & Celik, I. (2021, June). Life Cycle Assessment of Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells Coupled with Solar Flow Battery Systems. In *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 0355-0359). IEEE.
- Sadeghi, S., Ghandehariun, S., & Rosen, M. A. (2020). Comparative economic and life cycle assessment of solar-based hydrogen production for oil and gas industries. *Energy*, *208*, 118347.
- Soares, W. M., Athayde, D. D., & Nunes, E. H. (2018). LCA study of photovoltaic systems based on different technologies. *International Journal of Green Energy*, *15*(10), 577-583.
- Stylos, N., & Koroneos, C. (2014). Carbon footprint of polycrystalline photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, *64*, 639-645.
- Sumper, A., Robledo-García, M., Villafáfila-Robles, R., Bergas-Jané, J., & Andrés-Peiró, J. (2011). Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain). *Renewable and sustainable energy reviews*, *15*(8), 3888-3896.
- Weyand, S., Wittich, C., & Schebek, L. (2019). Environmental performance of emerging photovoltaic technologies: Assessment of the status quo and future prospects based on a meta-analysis of life-cycle assessment studies. *Energies*, *12*(22), 4228.
- Wong, J.H., Royapoor, M., Chan, C.W. (2016) Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, *58*, 608–618.
- Yang, D., Liu, J., Yang, J., & Ding, N. (2015). Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade. *Journal of cleaner production*, *94*, 35-45.
- Ziemińska-Stolarska, A., Pietrzak, M., & Zbiciński, I. (2021). Application of LCA to Determine Environmental Impact of Concentrated Photovoltaic Solar Panels—State-of-the-Art. *Energies*, *14*(11), 3143.

