



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
UNIVERSITY OF PIRAEUS

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
«Διαχείριση Ενέργειας & Περιβάλλοντος»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Υβριδικά Συστήματα Αυτόνομα και Διασυνδεδεμένα»



Συγγραφή – Επιμέλεια : Χαράλαμπος Αναγνώστου (ΤΜΣ 1808), Μηχανολόγος Μηχανικός

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Δεδούσης

Πειραιάς, 2023

Περίληψη

Η παρούσα έρευνα εξετάζει το πεδίο των αυτόνομων και δικτυωμένων υβριδικών συστημάτων, δίνοντας κυρίως έμφαση στις χρήσεις τους σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την κυκλική οικονομία. Εν όψει των σοβαρών προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο κόσμος με την κοινωνική ανάπτυξη και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, οι υβριδικοί οργανισμοί έχουν καταστεί ουσιαστικοί παράγοντες αλλαγής. Επισημαίνουμε τη σημασία που διαδραματίζουν τα υβριδικά συστήματα στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης, καθώς εξετάζουμε την πολύπλοκη σχέση που υπάρχει μεταξύ αυτών και της κυκλικής οικονομίας.

Οι υβριδικοί οργανισμοί είναι ένας ιδιαίτερος συνδυασμός κοινωνικά συνειδητοποιημένων επιχειρήσεων και ιδρυμάτων με γνώμονα το κέρδος. Εξετάζουμε πόσο σημαντικοί είναι για την επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης, ιδίως υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας, η οποία δίνει έμφαση στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και την αποδοτικότητα των πόρων. Καλύπτεται επίσης η σύνδεση των υβριδικών οργανισμών με τις κοινωνικές επιχειρήσεις, τονίζοντας την αφοσίωσή τους στην αντιμετώπιση της βιωσιμότητας τόσο στο κοινωνικό όσο και στο περιβαλλοντικό μέτωπο.

Διερευνούμε επίσης τη σχέση μεταξύ του *Laudato Si* και της κυκλικής οικονομίας, τονίζοντας τη σημασία αυτών των αλληλένδετων συστημάτων για την αντιμετώπιση των πολύπλοκων ζητημάτων που προκαλούν η εξάντληση των πόρων και η κλιματική αλλαγή. Η στροφή προς τη βιώσιμη ενέργεια αποτελεί κρίσιμο μέρος αυτού του έργου. Αναλύουμε το ελληνικό τοπίο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, φωτίζοντας τις επιπτώσεις της χρήσης λιγνίτη και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον. Εξετάζουμε επίσης τις διεθνείς πρωτοβουλίες για την αντιμετώπιση αυτών των παγκόσμιων ζητημάτων, καθώς και το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή.

Παρέχουμε μια διεξοδική επισκόπηση των πολλών ειδών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και του ρόλου τους στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Οι

ΑΠΕ είναι απαραίτητες για τη δημιουργία ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος. Ειδικότερα, τα υβριδικά συστήματα παρέχουν δημιουργικούς τρόπους για την τροφοδοσία απομονωμένων ή εξειδικευμένων φορτίων και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα σημερινά δίκτυα. Εξετάζουμε μια σειρά εφαρμογών υβριδικών συστημάτων, υπογραμμίζοντας πώς μπορούν να συμβάλουν στην κάλυψη του χάσματος μεταξύ της παραδοσιακής και της βιώσιμης παραγωγής ενέργειας.

Κάνουμε μια εκτενή βιβλιογραφική ανάλυση της έρευνας και των αναλύσεων κύκλου ζωής, τόσο διεθνώς όσο και στον ελληνικό χώρο, για να υποστηρίξουμε τη διερεύνησή μας. Οι μελέτες αυτές παρέχουν σημαντικές νέες αντιλήψεις για τις οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δικτυωμένων, αυτόνομων υβριδικών συστημάτων. Επιπλέον, παρουσιάζεται η ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής ως κρίσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με έμφαση στο μέγεθος των ηλιακών συστοιχιών. Η έρευνα παρουσιάζει επίσης μια ολοκληρωμένη άποψη των αυτοδιαχειριζόμενων και δικτυωμένων υβριδικών συστημάτων, υπογραμμίζοντας τον κρίσιμο ρόλο τους στην προώθηση της βιωσιμότητας, τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και την ενίσχυση της οικονομικής αποδοτικότητας. Τονίζεται πόσο ζωτικής σημασίας είναι η χρήση δημιουργικής σκέψης και διεπιστημονικών τρόπων για την αντιμετώπιση των δύσκολων προβλημάτων του σύγχρονου κόσμου.

Λέξεις κλειδιά

Ενεργειακή απόδοση, βιωσιμότητα, διασυνδεδεμένα συστήματα, υβριδικά συστήματα, ανάλυση κύκλου ζωής (LCA), ανάλυση κόστους ζωής (LCC).

Abstract

This research explores the field of self-contained and networked hybrid systems, primarily emphasizing its uses in relation to renewable energy and the circular economy. In the face of the world's serious issues with social development and environmental sustainability, hybrid organizations have become essential agents of change. We highlight the significance that hybrid systems play in promoting sustainable development as we examine the complex link that exists between them and the circular economy.

Hybrid organizations are a special combination of socially conscious businesses and profit-driven institutions. We look at how important they are for achieving sustainable development objectives, especially in light of the circular economy, which emphasizes waste minimization and resource efficiency. It also covers the connection of hybrid organizations with social businesses, highlighting their dedication to tackling sustainability on both the social and environmental fronts.

We also explore the relationship between Laudato Si and the circular economy, highlighting the significance of these interrelated systems in tackling the complex issues brought on by resource depletion and climate change. Making the shift to sustainable energy is a crucial part of this project. We analyze the Greek electrical generating landscape, illuminating the effects of lignite use and carbon dioxide emissions on the environment. We also look at international initiatives to address these global issues, as well as the greenhouse effect and climate change.

We provide a thorough overview of the many kinds of renewable energy sources (RES) and their roles in mitigating climate change. RES are essential to establishing a sustainable energy future. In particular, hybrid systems provide creative ways to supply isolated or specialized loads and incorporate renewable energy sources into current networks. We explore a range of hybrid system applications, highlighting how they might help close the gap between traditional and sustainable energy production.

We do an extensive literature analysis of research and life cycle analyses, both internationally and in the Greek context, to support our investigation. These studies provide important new understandings of the economic and environmental effects of networked, autonomous hybrid systems. Furthermore, life cycle cost analysis is presented as a critical instrument for evaluating the financial sustainability of power plants, with an emphasis on solar array size. The research also presents a comprehensive view of self-governing and networked hybrid systems, highlighting their critical role in advancing sustainability, mitigating climate change, and boosting economic efficiency. It emphasizes how crucial it is to use creative thinking and multidisciplinary ways to tackle the difficult problems of the modern world.

Keywords

Energy Efficiency, Sustainability, Interconnected Systems, Hybrid Systems, Life-Cycle Analysis (LCA), Life Cost Analysis (LCC)

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς και επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας κύριο Βασίλειο Δεδούση για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα την υποψήφια διδάκτορα του Πανεπιστημίου Πειραιώς, κυρία Αγγελική Σαγάνη, για την πολύτιμη καθοδήγηση και το χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, συμβάλλοντας καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Χαράλαμπος Αναγνώστου

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Λέξεις κλειδιά.....	4
Abstract	5
Keywords	6
Κατάλογος εικόνων.....	10
Κατάλογος πινάκων	10
Εισαγωγή.....	11
1. Η σχέση των υβριδικών συστημάτων με την κυκλική οικονομία	13
1.1. Η ανάδυση υβριδικών οργανισμών για την αειφόρο ανάπτυξη.....	13
1.2. Υβριδικοί οργανισμοί και κοινωνικές επιχειρήσεις	15
1.3. Κυκλική οικονομία και περιβαλλοντική βιωσιμότητα	17
1.4. Κυκλική οικονομία και κοινωνική βιωσιμότητα.....	17
1.5. Κυκλική οικονομία και εγκύκλιος "LaudatoSi	19
2. Μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.....	22
2.1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα.....	22
2.2. Ο Λιγνίτης και οι Εκπομπές CO2	23
2.3. Φαινόμενο του Θερμοκηπίου και Κλιματική Αλλαγή.....	25
2.4. Διεθνείς Προσπάθειες Αντιμετώπισης της Κλιματικής Αλλαγής	25
2.5. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας(ΑΠΕ).....	28
2.6. Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	32
2.7. Ο Ρόλος των ΑΠΕ στην Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής.....	33
3. Υβριδικά Συστήματα.....	36
3.1. Εφαρμογές Υβριδικών Συστημάτων	37
3.1.1. Υβριδικά Συστήματα Παραγωγής Διασυνδεδεμένα σε Κεντρικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	37
3.1.2. Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα (Μη Διασυνδεδεμένα).....	38
3.1.3. Τροφοδότηση Απομονωμένων Φορτίων ή Φορτίων Ειδικού Σκοπού.....	39
4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μελετών και Ανάλυση Κύκλου Ζωής	40
4.1. Διεθνώς.....	40
4.1.1. Μελέτες Αυτόνομων Υβριδικών Συστημάτων	42
4.2. Στην Ελλάδα	46
4.3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA).....	49

4.4. Μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)	50
5. Ανάλυση κόστους ζωής (LCC)	54
5.1. Ανάλυση των υβριδικών συστημάτων και του κόστους κύκλου ζωής στη Νιγηρία	54
5.1.1. Οικονομικά των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	59
5.1.2. Έννοια της παρούσας αξίας.....	59
5.1.3. Φορτίο συστήματος	60
.....	61
5.1.4. Φωτοβολταϊκή συστοιχία	61
5.1.5. Διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας	62
5.1.6. Οικονομική ανάλυση.....	64
5.1.7. Κόστος κύκλου ζωής.....	64
5.1.8. Συνολικό ετήσιο κόστος	65
5.1.9. Ετήσιο κόστος κεφαλαίου (απόσβεση)	66
5.1.10. Ετήσιο κόστος αντικατάστασης (Ταμείο Αποσβέσεων).....	66
5.1.11. Κόστος ενέργειας (COE)	67
5.2. Υβριδικά συστήματα ισχύος ηλιακής-αιολικής ενέργειας στις βιομηχανίες	70
5.3. Αξιολόγηση του κύκλου ζωής των μπαταριών ιόντων λιθίου για υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα plug-in.....	71
5.4. Μικροδίκτυα συνδεδεμένα στο δίκτυο	73
5.5. Τεχνικοοικονομική ανάλυση υβριδικού συστήματος ηλιακής ενέργειας και βιομάζας αγροτικών περιοχών.....	74
5.6. Τεχνικοοικονομική ανάλυση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος: Δονούσα, Ελλάδα	75
6. Συνδυασμός ανάλυσης κύκλου ζωής και ανάλυση κόστους ζωής σε υβριδικά συστήματα.	78
6.1. Εκτίμηση κύκλου ζωής και ανάλυση κόστους κύκλου ζωής ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	78
6.2. Μοντελοποίηση του κόστους κύκλου ζωής συμβατικών και εναλλακτικών οχημάτων	79
6.3. Συστήματα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας από βιομάζα.....	81
6.4. Υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές ..	83
Συμπέρασμα.....	85
Βιβλιογραφία	87

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων κύκλου ζωής μεταξύ των συστημάτων ΑΠΕ και Diesel.....	52
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Daily average electricity demand for month of March (2010).....	61
Πίνακας 2 Meteorological data and global solar radiation for Enugu (Lat: 6026'24"N and Long: 7030'36"E).....	61
Πίνακας 3 Hybrid system LCC vs. Number of modules.....	68
Πίνακας 4 Life cycle cost result of the optimal hybrid system (20 modules).....	69

Εισαγωγή

Σε μια εποχή που χαρακτηρίζεται από τις αυξανόμενες ανησυχίες γύρω από την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την οικονομική αποτελεσματικότητα, η έλευση των υβριδικών συστημάτων δημιούργησε μια ακτίνα αισιοδοξίας για ένα μέλλον που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αρμονία. Η ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών και μεθοδολογιών στο πλαίσιο αυτών των συστημάτων αποτελεί μια ευκαιρία για τη συμφιλίωση της διχοτόμησης μεταξύ αυτονομίας και διασύνδεσης, καθώς αγωνιζόμαστε για την υλοποίηση μιας κυκλικής οικονομίας. Το παρόν κεφάλαιο θέτει τα θεμέλια για την ολοκληρωμένη εξέταση των υβριδικών συστημάτων και της καθοριστικής συμβολής τους στην εξέλιξη της κυκλικής οικονομίας (EllenMacArthurFoundation, 2013). Τον τελευταίο καιρό, η έννοια της κυκλικής οικονομίας έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή ως βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση των επειγόντων ζητημάτων της εξάντλησης των πόρων, της παραγωγής αποβλήτων και της περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Η έννοια θέτει ένα αναγεννητικό παράδειγμα προς την οικονομική δραστηριότητα, όπου οι πόροι εμπλέκονται διαρκώς σε κύκλους χρήσης, επαναχρησιμοποίησης και επαναπροσδιορισμού, μετριάζοντας έτσι τη δημιουργία αποβλήτων και μειώνοντας τις δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ωστόσο, η αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού της κυκλικής οικονομίας απαιτεί την εφαρμογή καινοτόμων λύσεων και τεχνολογιών που διαθέτουν την ικανότητα να πλοηγούνται αποτελεσματικά στο περίπλοκο δίκτυο παραγωγής, κατανάλωσης και διαχείρισης αποβλήτων (Klikauer, 2013).

Τα υβριδικά συστήματα αποτελούν την επιτομή μιας ιδιαίτερα ευοίωνης πορείας στην επιδίωξη της κυκλικότητας. Τα συστήματα αυτά, που συχνά αξιοποιούν ένα ευρύ φάσμα πηγών ενέργειας και τεχνολογιών, διαθέτουν την απαιτούμενη προσαρμοστικότητα και ευελιξία για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των πολύπλευρων προκλήσεων της σύγχρονης εποχής μας. Μέσω της απρόσκοπτης ενσωμάτωσης αυτόνομων και διασυνδεδεμένων στοιχείων, τα υβριδικά συστήματα διαθέτουν την εγγενή ικανότητα να βελτιστοποιούν αποτελεσματικά τη χρήση των

πόρων, να μετριάζουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και να αυξάνουν την οικονομική βιωσιμότητα (EllenMacArthurFoundation, 2013).

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (LCA) είναι ένα τρομερό εργαλείο που μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε ολιστικά τις οικολογικές επιπτώσεις που σχετίζονται με διάφορα αγαθά και πλαίσια καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Μέσω της αξιοποίησης της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής σε υβριδικά συστήματα, οι μελετητές έχουν ποσοτικοποιήσει και αξιολογήσει με επιτυχία τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που σχετίζονται με αυτές τις πρωτοποριακές λύσεις. Το παρόν κεφάλαιο χρησιμεύει ως μια ολοκληρωμένη ανάλυση των ανακαλύψεων, των μεθοδολογιών και των προτύπων στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής όσον αφορά τα υβριδικά συστήματα (Gerbinetetal., 2014).

1. Η σχέση των υβριδικών συστημάτων με την κυκλική οικονομία

1.1. Η ανάδυση υβριδικών οργανισμών για την αειφόρο ανάπτυξη

Το υφιστάμενο οικονομικό παράδειγμα χαρακτηρίζεται από πλήθος αποτυχιών, οι οποίες έχουν διερευνηθεί και αναλυθεί εκτενώς σε ένα ευρύ φάσμα διεπιστημονικής βιβλιογραφίας. Ερευνητές που προέρχονται από διάφορους ακαδημαϊκούς κλάδους έχουν αναλάβει μια ολοκληρωμένη εξέταση των πολύπλευρων ζητημάτων που μαστίζουν τις κοινωνίες μας, από την εγγενή απουσία κοινωνικής δικαιοσύνης έως την ανησυχητική οικολογική υποβάθμιση του κοινού μας βιότοπου. Από τη μία πλευρά, οι εν λόγω μελετητές έχουν εξετάσει επιμελώς τους ιστορικούς παράγοντες που προκάλεσαν τη σημερινή μας δυσχερή θέση, την οποία θεωρούν ως αμετάκλητη συγκυρία. Από την άλλη πλευρά, έχουν διερευνήσει με σοβαρότητα πιθανές θεραπείες και εναλλακτικούς δρόμους για να απεγκλωβιστούμε από αυτή τη θλιβερή κατάσταση πραγμάτων. Μία από τις πρωταρχικές ανησυχίες αφορούσε τη γραμμική πορεία που ενυπάρχει στο επικρατούν οικονομικό πλαίσιο, το οποίο ασκεί την επιρροή του από την έλευση της βιομηχανικής επανάστασης (Nesterova, 2020). Το υπό εξέταση φαινόμενο βασίζεται σε μια δυναμική προσανατολισμένη στην ανάπτυξη, η οποία χαρακτηρίζεται από τις διαδοχικές διαδικασίες της απόκτησης, της παραγωγής, της χρήσης και της διάθεσης, δημιουργώντας έτσι μια προοδευτικά διαδεδομένη "κουλτούρα της σπατάλης" (Bruni, 2020). Η προαναφερθείσα κουλτούρα έχει εμφανίσει σημαντικές προεκτάσεις όχι μόνο σε περιβαλλοντικό επίπεδο, με αποτέλεσμα την υπερβολική παραγωγή αποβλήτων που ξεπερνά την ικανότητα απορρόφησης του αστικού συστήματος, αλλά επίσης, και κυρίως, σε κοινωνικό επίπεδο (Klikauer, 2013). Οι προ-οικονομικές αρετές, δηλαδή η καλοσύνη, η αφοσίωση, η ταπεινότητα, το έλεος, η γενναιοδωρία και η φιλοξενία, θεωρούνται αντιπαραγωγικές και αναποτελεσματικές σε σύγκριση με τις επικρατούσες αρχές του μηχανικού ορθολογισμού και της αποδοτικότητας. Το προαναφερθέν φαινόμενο, που ενισχύεται από τον λόγο γύρω από την αξιοκρατία,

μετατρέπει τα άτομα σε εμπορεύματα και δημιουργεί μια διχοτόμηση που τα διαχωρίζει σε δύο διακριτά άκρα. Στο ένα άκρο βρίσκονται τα άτομα που επιδεικνύουν ικανότητες, δικαιολογώντας έτσι την απασχόληση, την ευημερία και την κοινωνική καταξίωση, καθώς ευθυγραμμίζονται με τις απαιτήσεις της αγοράς. Αντίθετα, στο άλλο άκρο βρίσκονται εκείνοι που, συχνά χωρίς δική τους υπαιτιότητα, επιδεικνύουν κατώτερες επιδόσεις, δεν έχουν ικανότητες και θεωρούνται περιττοί λόγω της αδυναμίας τους να συμβάλουν ουσιαστικά στην οικονομική προσπάθεια. Κατά συνέπεια, όταν η επιδίωξη της μεγιστοποίησης του κέρδους και άλλων οικονομικών στόχων υπερισχύει της εξέτασης των ανθρώπινων αξιών, προκύπτει η εκδήλωση αποκλεισμού, διακρίσεων και πόνου. Σε παγκόσμια κλίμακα, οι κρίσεις που αντιμετωπίζουμε σήμερα μπορούν να αποδοθούν σε έναν μοναδικό υποκείμενο παράγοντα: την ανικανότητα και την ανεπάρκεια του επικρατούντος οικονομικού συστήματος να προσαρμοστεί σύμφωνα με τους φυσικούς ρυθμούς και τις ανθρώπινες ανάγκες, ενώ παράλληλα εμφανίζει χαρακτηριστικά μιας οικονομίας που "καταναλώνει φυσικούς πόρους, είναι κοινωνικά διχαστική και περιβαλλοντικά ανταγωνιστική" (EuropeanCommission, 2019). Το προαναφερθέν συμπέρασμα προβλέφθηκε με αξιοσημείωτη διαύγεια στην εγκύκλιο "LaudatoSi", όπου υπογραμμίζεται η σημασία του πολιτισμού και η επιτακτική ανάγκη μιας πολιτιστικής επανάστασης (Sánchez&Martínez, 2018). Η έμφαση στη συγκεκριμένη πτυχή αναδείχθηκε ομοίως σε παγκόσμια κλίμακα μέσω των πρωτοβουλιών της Ατζέντας 2030 των Ηνωμένων Εθνών, της COP21 και της Νέας Αστικής Ατζέντας. Από την ερώτηση "Τι είδους κόσμο επιθυμούμε να κληροδοτήσουμε στις μελλοντικές γενιές;" προκύπτει η επιτακτική ανάγκη να διακρίνουμε θεωρητικές πτυχές ικανές να επιφέρουν την προβλεπόμενη πολιτισμική μεταμόρφωση. Υπάρχουν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις στο κυρίαρχο παράδειγμα της μεγιστοποίησης του κέρδους.

Στο σήμερα, υπάρχει μια συλλογική επιταγή να τροποποιήσουμε τις μεθόδους παραγωγής μας, με στόχο τη διευκόλυνση μιας δίκαιης αναδιανομής του πλούτου, με ταυτόχρονη άμβλυνση των δυσμενών κοινωνικών και περιβαλλοντικών συνεπειών (EllenMacArthurFoundation, 2013).

Συνοψίζοντας, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για τη δημιουργία ενός νέου "υβριδικού" οικονομικού πλαισίου που διαθέτει την ικανότητα να βελτιώσει την υφιστάμενη κατάσταση πραγμάτων. Το πλαίσιο αυτό θα πρέπει να δίνει προτεραιότητα στη βελτιστοποίηση όχι μόνο των εργαλειακών αξιών αλλά και των άυλων αξιών που συνδέονται με την ανθρωπότητα και το φυσικό οικοσύστημα (Battilana et al., 2015). Στη σύγχρονη εποχή, είναι προφανές ότι υπάρχει ένας αυξανόμενος πολλαπλασιασμός των προσπαθειών που διαθέτουν διττό ή ακόμη και τριπλό σκοπό, δηλαδή την επίτευξη οικονομικής βιωσιμότητας παράλληλα με την παροχή ευεργετικής επιρροής στην κοινωνία ή/και το περιβάλλον. Οι προαναφερθείσες οντότητες αναγνωρίζονται ευρέως ως "υβριδικοί οργανισμοί", οι οποίοι μπορούν να οριστούν ως οργανισμοί που ενσωματώνουν θεσμικές λογικές στην προσπάθειά τους να δημιουργήσουν εφευρετικές λύσεις σε περίπλοκα προβλήματα. Οι οργανισμοί αυτοί έχουν κερδίσει παγκόσμια αναγνώριση λόγω της ικανότητάς τους να υιοθετούν το σύγχρονο παράδειγμα που συνήθως αναφέρεται ως βιώσιμη ανάπτυξη (Jay, 2013). Οι υβριδικοί οργανισμοί τυπικά αναδύονται ως αποτέλεσμα εννοιολογήσεων και ανακαλύψεων που αμφισβητούν τις επικρατούσες νόρμες και προσπαθούν να διερευνήσουν νέες προσεγγίσεις στην παραγωγή και την κατανάλωση (Haigh & Hoffman, 2011).

1.2. Υβριδικοί οργανισμοί και κοινωνικές επιχειρήσεις

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, παρατηρήθηκε μια αξιοσημείωτη αύξηση της ευαισθητοποίησης των ατόμων όσον αφορά τις επιπτώσεις που απορρέουν από τις επιχειρησιακές προσπάθειες μιας επιχείρησης. Διάφορα ενδιαφερόμενα μέρη, συμπεριλαμβανομένων των καταναλωτών, των επενδυτών, των εργαζομένων, των ιδρυμάτων και των οργανισμών, άρχισαν να εκφράζουν την αποδοκιμασία τους προς τις εταιρείες των οποίων η συμπεριφορά θεωρήθηκε επιζήμια είτε για την κοινωνία είτε για το φυσικό περιβάλλον. Με παρόμοιο τρόπο, πρόσθετα άτομα εντός της καταναλωτικής βάσης, καθώς και επενδυτές και διάφοροι κοινωνικοί παράγοντες, άρχισαν να αποδίδουν υψηλότερη χρηματική αξία σε

επιχειρήσεις των οποίων τα αποτελέσματα ήταν επωφελής για μια σημαντική ομάδα ενδιαφερομένων, που περιλάμβανε το άμεσο περιβάλλον, το φυσικό περιβάλλον και το εργατικό δυναμικό (Martinet al., 2009). Η εννοιολόγηση του ρόλου της επιχείρησης υπέστη μετασχηματισμό, μεταβαίνοντας από την εστίαση στη μεγιστοποίηση της αξίας των μετόχων στην υιοθέτηση της προοπτικής της κοινής αξίας (Magillet al., 2013). Σε απάντηση, πολλαπλές εταιρικές οντότητες προσπάθησαν να εναρμονίσουν και να εξισορροπήσουν τις προσδοκίες των διαφόρων ενδιαφερόμενων μερών, υιοθετώντας έτσι νέες πολιτικές και πρακτικές που ευθυγραμμίζονται με τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος και της ανθρωπότητας. Έτσι, αναδύθηκαν νέα οργανωτικά μοντέλα, τα οποία χαρακτηρίζονται από μια αποστολή που υπερβαίνει την απλή μεγιστοποίηση του κέρδους, περιλαμβάνοντας έναν ευρύτερο προσανατολισμό προς κοινωνικούς ή περιβαλλοντικούς στόχους. Η ονοματολογία που αποδίδεται συνήθως σε αυτές τις νέες οντότητες είναι αυτή των "υβριδικών οργανισμών", όπως διατυπώθηκε από τους Battilana και Dorado στο θεμελιώδες έργο τους το 2010. Η ονοματολογία "υβριδικός" προκύπτει από την τάση να ενσωματώνουν τόσο τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μιας οντότητας με γνώμονα το κέρδος όσο και εκείνα μιας μη κερδοσκοπικής οργάνωσης. Μεταξύ των διαφόρων τυπολογιών των υβριδικών οργανισμών, η κοινωνική επιχείρηση είναι αυτή που έχει συγκεντρώσει την ευρύτερη διάδοση, όπως αποδεικνύεται από την έρευνα που διεξήγαγαν οι Dacin και συν (2011). Η υπάρχουσα βιβλιογραφία έχει καταδείξει ότι οι υβριδικοί οργανισμοί αντιμετωπίζουν σημαντικές δυσκολίες στην πλοήγηση στις εγγενείς εντάσεις και συγκρούσεις που προκύπτουν από τη συνύπαρξη οικονομικών και κοινωνικών λογικών (Pache&Santos, 2010). Αυτές οι επιστημονικές έρευνες έχουν συμβάλει σημαντικά στη διαλεύκανση των μηχανισμών που εμπλέκονται στην καλλιέργεια και τη διατήρηση μιας υβριδικής ουσίας. Η εξέταση του τρόπου με τον οποίο οι υβριδικοί οργανισμοί εφαρμόζουν μοντέλα κυκλικής οικονομίας για να συμβάλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη είναι ένα θέμα που έχει λάβει περιορισμένη προσοχή μέχρι στιγμής. Η υιοθέτηση μοντέλων κυκλικής οικονομίας αποτελεί μια τρομερή πρόκληση για τους υβριδικούς οργανισμούς, καθώς είναι επιρρεπής στην υποκίνηση εσωτερικών εντάσεων που μπορεί να εμποδίσουν την ταυτόχρονη

υλοποίηση τόσο των οικονομικών στόχων όσο και των κοινωνικών ή περιβαλλοντικών στόχων (Besharou & Smith, 2014).

1.3. Κυκλική οικονομία και περιβαλλοντική βιωσιμότητα

Στο σημερινό πλαίσιο, η κυκλική οικονομία τονίζεται όλο και περισσότερο ως παράδειγμα που τεκμηριώνει την έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κυκλική οικονομία ευθυγραμμίζεται με τους ποικίλους στόχους των υβριδικών οργανισμών, όπως τονίζεται από τους Ghisellini et al. (2016). Η έννοια της κυκλικής οικονομίας διατυπώνεται ως αντίλογος στο κυρίαρχο γραμμικό οικονομικό μοντέλο, το οποίο στηρίζεται στο ευρέως αναγνωρισμένο πλαίσιο εξόρυξης, παραγωγής, χρήσης και απόρριψης, επιδιώκοντας τελικά την αποσύνδεση της οικονομικής ευημερίας από τη χρήση των πόρων (Korhonen et al., 2018). Στο εξής, τα κυκλικά επιχειρηματικά μοντέλα προσπαθούν να παρατείνουν τη διατήρηση της αξίας που ενυπάρχει στα προϊόντα εντός της οικονομίας, με απώτερο στόχο τη μείωση της εξάρτησης από τους πρωτογενείς πόρους. Η αποδοτική κατανομή της παροχής πόρων και η αποτελεσματική ενσωμάτωση των διαδικασιών αφομοίωσης αποβλήτων εξαρτώνται από τη δημιουργία ροών υλικών κλειστού κύκλου. Από μια τέτοια οπτική γωνία, μπορεί να υποστηριχθεί ότι η προώθηση των ανθεκτικών ή εύκολα διαλυόμενων αγαθών τονίζει την ύψιστη σημασία του αρχικού σταδίου σχεδιασμού για την εξασφάλιση της ελάχιστης επίπτωσης στον συνολικό κύκλο ζωής ενός προϊόντος (Sauvé et al., 2016).

1.4. Κυκλική οικονομία και κοινωνική βιωσιμότητα

Ενώ ο αρχικός σκοπός της κυκλικής οικονομίας επικεντρώθηκε κυρίως στον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαδικασιών παραγωγής και κατανάλωσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η έννοια της "κυκλικότητας" μπορεί επίσης να επεκταθεί ώστε να συμπεριλάβει τις κοινωνικές και πολιτιστικές πτυχές (Mies & Gold,

2021). Αναμφίβολα, προκειμένου να υπάρξει ουσιαστική συμβολή στην επιδίωξη της βιώσιμης ανάπτυξης, είναι επιτακτική η ταυτόχρονη και αρμονική αντιμετώπιση και συμφιλίωση της οικονομικής, της περιβαλλοντικής και της κοινωνικής διάστασης (Manninenetal., 2018). Η κυκλική οικονομία προσπαθεί να προωθήσει τη συμμετοχικότητα και την ενεργό συμμετοχή, όπως αποδεικνύεται από το ποικίλο φάσμα επιχειρηματικών μοντέλων που περιλαμβάνει. Η ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της παραγωγικότητας με χαμηλό αντίκτυπο εξαρτάται από την επιτακτική ανάγκη συνεργασίας εντός της αλυσίδας αξίας και τη συνεργιστική αλληλεπίδραση διαφόρων ενδιαφερόμενων μερών (Moreauetal., 2017). Για παράδειγμα, η εφαρμογή επιχειρηματικών πρακτικών, όπως ο συν-σχεδιασμός ή τα συστήματα ανάκτησης, απαιτεί τη δημιουργία ενός ισχυρού δικτύου και την ενεργό συμμετοχή των πελατών στη διαδικασία συν-δημιουργίας αξίας (Ketkar&Ratha, 2008). Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η συνεργατική κατανάλωση και τα μοντέλα προϊόντων ως υπηρεσιών διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην προώθηση μιας πιο βιώσιμης χρήσης των προϊόντων, ενώ ταυτόχρονα διευρύνουν την προσβασιμότητα των συγκεκριμένων αγαθών σε άτομα που προηγουμένως εμποδίζονταν να τα αποκτήσουν (Lüdeke-Freund&Dembek, 2017). Στη σφαίρα των συνεργατικών μοντέλων κατανάλωσης, όπου χρησιμοποιούνται πρακτικές διαμοιρασμού, δανεισμού, ενοικίασης και παρόμοιες πρακτικές, παρέχεται στους καταναλωτές η δυνατότητα να συμμετέχουν σε υπηρεσίες χωρίς την ανάγκη φυσικής ιδιοκτησίας αγαθών. Η μετατόπιση της νοοτροπίας των καταναλωτών από την εστίαση στην ιδιοκτησία στην προτεραιότητα της λειτουργικότητας αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην επιτυχή εφαρμογή κυκλικών επιχειρηματικών μοντέλων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι οι διάφορες προσπάθειες που αφορούν την κυκλική οικονομία, όπως η πρακτική της ανακατασκευής, παρουσιάζουν έναν έντονο εργασιακό χαρακτήρα σε αντίθεση με την ένταση των πόρων. Αυτό το χαρακτηριστικό ενέχει τη δυνατότητα να προωθήσει την ανάπτυξη ευκαιριών απασχόλησης και να ενισχύσει τις ικανότητες των ατόμων (Schalteggeretal., 2012).

Με βάση την προαναφερθείσα συζήτηση, καθίσταται προφανές ότι υπάρχει ανάγκη να κατευθυνθούν οι επενδύσεις προς την υιοθέτηση στρατηγικών εφαρμογής που επιδιώκουν να επανεξετάσουν, με κυκλικό τρόπο, τη συμπεριφορά των

παραγωγών και των καταναλωτών, καθώς και τις διασυνδέσεις μεταξύ αυτών και του περιβάλλοντος που τους περιβάλλει, φυσικού και πολιτιστικού χαρακτήρα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της καθιέρωσης νέων εργασιακών σχέσεων, επιχειρηματικών μοντέλων και πλαισίων εταιρικής κοινωνικής ευθύνης (Schalteggeretal., 2016).

1.5. Κυκλική οικονομία και εγκύκλιος "LaudatoSi

Η έννοια της κυκλικότητας είναι στενά συνυφασμένη με την έννοια της αναγέννησης, η οποία εννοείται ως η αποκατάσταση του φυσικού κεφαλαίου, καθώς και η αναζωογόνηση των υφιστάμενων υλικών και αρχιτεκτονικών. Επιπλέον, περιλαμβάνει τη βελτίωση του τρόπου ζωής και της ευημερίας των ατόμων μέσω της παροχής νέων ευκαιριών (Rosaetal., 2019). Η έννοια της κυκλικής οικονομίας, η οποία περιλαμβάνει μια αναγεννητική προσέγγιση των οικονομικών συστημάτων, περικλείεται σε έναν ευρέως αποδεκτό και συχνά χρησιμοποιούμενο ορισμό της κυκλικής οικονομίας. Συγκεκριμένα, το Ίδρυμα EllenMacArthur ορίζει την κυκλική οικονομία ως ένα βιομηχανικό σύστημα το οποίο είναι σκόπιμα και σκόπιμα αποκαταστατικό ή αναγεννητικό από τη φύση του. Διάφορα πλαίσια κυκλικής οικονομίας βασίζονται στην έννοια της αποκατάστασης, η οποία συνδέεται στενά με την έννοια της αποκατάστασης της βλάβης με την επιστροφή σε μια προηγούμενη ή αρχική κατάσταση (Girardetal., 2014). Οι κυκλικοί κύκλοι παραγωγής περιλαμβάνουν διάφορες πρακτικές, όπως η διαχείριση αποβλήτων, η επισκευή και η ανακατασκευή, οι οποίες χρησιμεύουν για την ενσωμάτωση της αποκατάστασης στο σύστημα. Παρ' όλα αυτά, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι η έννοια της αναγέννησης υπερβαίνει την απλή ανάκτηση υλικών ή ενέργειας. Αντίθετα, περιλαμβάνει μια συνολική ενίσχυση του γενικότερου βιοτικού και οικονομικού πλαισίου, σε αντίθεση με τις συμβατικές πρακτικές της οικονομίας και της διαχείρισης των πόρων (Valenzuela&Böhm, 2017).

Αναμφίβολα, σε παγκόσμια κλίμακα, το πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας έχει συγκεντρώσει αναγνώριση ως μηχανισμός που ξεπερνά μια στενή τομεακή προοπτική

με επίκεντρο αποκλειστικά τη διαχείριση των αποβλήτων. Αντίθετα, λειτουργεί ως καταλύτης για την ενίσχυση της συνολικής οργάνωσης μιας πόλης, που περιλαμβάνει την οικονομία, το κοινωνικό σύστημα και τη διακυβέρνησή της, προωθώντας έτσι πολύπλευρες προόδους στην αστική παραγωγικότητα (Bonesio, 2007). Η υιοθέτηση ενός κυκλικού μοντέλου παραγωγής και κατανάλωσης διευκολύνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση η οποία όχι μόνο επιδιώκει να μετριάσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που απορρέουν από την παραγωγή αποβλήτων, αλλά στοχεύει επίσης στην ταυτόχρονη βελτίωση της συνολικής ποιότητας ζωής, προωθώντας παράλληλα την καινοτομία, την οικονομική ανάπτυξη και τις ευκαιρίες απασχόλησης (Rose, 2020).

Αυτή η επεκτατική και περιεκτική προοπτική της αναγέννησης ενισχύει τη σύλληψη και την εκτέλεση εναλλακτικών επιχειρηματικών μοντέλων που δίνουν προτεραιότητα στην ενίσχυση τόσο των απορριπτόμενων υλικών όσο και των ευάλωτων ατόμων. Από αυτή τη συγκεκριμένη οπτική γωνία, το παράδειγμα της ολοκληρωμένης οικολογίας, όπως υποστηρίζεται από τον Πάπα Φραγκίσκο στην πρόσφατη εγκύκλιό του "LaudatoSi", έρχεται στο προσκήνιο. Το προαναφερθέν πλαίσιο περιλαμβάνει βασικές αρχές όπως η συμμετοχή, η συνεργασία, η συν-εξέλιξη και η αυτοοργάνωση. Οι αρχές αυτές θεωρούνται καθοριστικές για την προώθηση της μακροζωίας της εξελικτικής δυναμικής εντός μιας συγκεκριμένης κοινότητας, λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετοχή των τοπικών φορέων και το φυσικό πλαίσιο (SCHLAGER, 2002). Η εγκύκλιος επιστολή "LaudatoSi" παρουσιάζει μια πρόταση σχετικά με τη βιώσιμη ανάπτυξη που ενσωματώνει μια ανθρωποκεντρική οπτική γωνία, καθιστώντας έτσι αναγκαία την επαναπροσδιορισμό της έννοιας της ανάπτυξης ως "ολοκληρωμένη και ανθρώπινη βιώσιμη ανάπτυξη". Από τη συγκεκριμένη οπτική γωνία, η επιχειρηματική προσπάθεια, με πρωταρχικό στόχο τη δημιουργία οικονομικής ευημερίας, αποκτά κομβική θέση, ιδίως όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο δομούνται και εποπτεύονται οι διάφορες επιχειρήσεις (Fusco, 2012). Η τελευταία οφείλει να κατευθύνεται προς τη συλλογική ευημερία και, με την ευρύτερη έννοια, προς τη βελτίωση της ποιότητας ζωής όλων των ατόμων, παρέχοντας ακόμη και στους πιο ευάλωτους την ευκαιρία να βελτιώσουν τις συνθήκες διαβίωσής τους και να καλλιεργήσουν τις ικανότητές τους. Το κυκλικό

μοντέλο παρουσιάζει μια νέα προοπτική για την καθοδήγηση των στρατηγικών προσεγγίσεων και προσπαθειών προς την κατεύθυνση της συλλογικής ευημερίας. Λειτουργεί με βάση την υπόθεση ότι η ουσία της ανθρωπότητας είναι αυτή του "homosocialis", του οποίου η ολοκλήρωση εξαρτάται από την ενίσχυση των διαπροσωπικών δεσμών που τον εντάσσουν σε μια ευρύτερη κοινότητα (Santori, 2021).

Στο εξής, θα προχωρήσουμε στη σκιαγράφηση της έννοιας της βιώσιμης ανάπτυξης λαμβάνοντας υπόψη τις πολλαπλές διαστάσεις της, και συγκεκριμένα την περιβαλλοντική, την κοινωνική και την οικονομική πτυχή της. Τα τελευταία χρόνια, η εννοιολόγηση της αειφορίας έχει υποστεί αξιοσημείωτη εξέλιξη. Προηγουμένως, κατανοούνταν κυρίως μέσα στα όρια της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Ωστόσο, η σύγχρονη επιστήμη έχει επεκτείνει αυτή την κατανόηση ώστε να περιλαμβάνει όχι μόνο την περιβαλλοντική πτυχή, αλλά και την κοινωνική και οικονομική διάσταση της αειφορίας. Η κοινωνική βιωσιμότητα εννοιολογείται ως ένα πλαίσιο οικονομικής ανάπτυξης που λαμβάνει υπόψη τα θεμελιώδη δικαιώματα των ατόμων που είναι πιο ευάλωτα και περιθωριοποιημένα. Η οικονομική βιωσιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα της οικονομικής ανάπτυξης να παράγει (Morenoetal., 2016).

2. Μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον

2.1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα

Στο πλαίσιο της Ελλάδας, είναι αξιοσημείωτο να παρατηρηθεί ότι τα επικρατούντα πρότυπα κατανάλωσης ενέργειας βασίζονται κυρίως σε συμβατικές πηγές, δηλαδή στον λιγνίτη και το πετρέλαιο. Δυστυχώς, η αναζήτηση εναλλακτικών και βιώσιμων πηγών ενέργειας είναι σχετικά περιορισμένη σε έκταση και μέγεθος. Εκτός από τις μεταφορές και την αναμενόμενη μελλοντική διάδοση του φυσικού αερίου τόσο για βιομηχανικούς όσο και για οικιακούς σκοπούς, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι η πιο σημαντική ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται είναι με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, η παραγωγή και η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα αποκτούν ύψιστη σημασία (Katsaprakakis&Christakis, 2016).

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα έχει σημειώσει αξιοσημείωτη άνοδο τα τελευταία χρόνια, ευθυγραμμιζόμενη με τη συνολική βελτίωση του βιοτικού επιπέδου που καθιστά αναγκαία τη χρήση ενεργοβόρων ηλεκτρικών οικιακών συσκευών, όπως κλιματιστικά, φούρνοι μικροκυμάτων και ηλεκτρικές κουζίνες. Ευτυχώς, είναι αξιοσημείωτο ότι το έθνος μας αξιοποιεί αποτελεσματικά μια σημαντική ποσότητα ηλιακής ενέργειας ειδικά για το σκοπό της θέρμανσης νερού, όπως αποδεικνύεται από την έρευνα που διεξήχθη από τους Hatzargyriou και συν (2005). Δυστυχώς, η αξιοποίηση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχει φθάσει ακόμη σε σημαντικό επίπεδο. Η απουσία πυρηνικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας στη χώρα μας, τόσο ιστορικά όσο και σήμερα, είναι αξιοσημείωτη, ακόμη και υπό το πρίσμα της παρουσίας κοιτασμάτων ουρανίου. Αυτή η προσεκτική προσέγγιση μπορεί να αποδοθεί στην αναγνώριση των πιθανών κινδύνων που συνδέονται με τα πυρηνικά ατυχήματα, όπως καταδεικνύεται από το καταστροφικό συμβάν στο Chernobyl το 1986 (Katsaprakakis&Christakis, 2016).

Η χώρα διαθέτει αξιοσημείωτα αποθέματα λιγνιτικών κοιτασμάτων, η εκμετάλλευση των οποίων έχει αναμφισβήτητα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη μέχρι τώρα ενεργειακή της πρόοδο. Η έναρξη της μεθοδικής εκμετάλλευσης του λιγνίτη με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εντοπίζεται στη δεκαετία του 1950. Επί του παρόντος, η προαναφερθείσα ανάπτυξη λαμβάνει χώρα εντός των λιγνιτικών κέντρων που βρίσκονται στη Δυτική Μακεδονία και συγκεκριμένα στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Ο εξορυσσόμενος λιγνίτης αξιοποιείται κυρίως για τους σκοπούς της ηλεκτροπαραγωγής, καλύπτοντας αποτελεσματικά περίπου το 63% των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευση των λιγνιτικών κοιτασμάτων είναι η προσέγγιση της συνεχούς λειτουργίας, η οποία ενσωματώνει ηλεκτροκίνητα μηχανήματα με σημαντική χωρητικότητα, όπως ερπυστριοφόρους εκσκαφείς, μεταφορείς και αποθεσιοθάλαμους. Σύμφωνα με τους Psomopoulos και συν. (2015), ο ετήσιος ρυθμός παραγωγής λιγνίτη από τα ορυχεία της PPC'S ανέρχεται κατά μέσο όρο σε 70 εκατομμύρια τόνους. Αυτός ο ρυθμός παραγωγής συνοδεύεται από εκσκαφές ύψους 336 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων το έτος 2005.

Η αξιοποίηση των λιγνιτικών κοιτασμάτων εκδηλώνεται κυρίως σε οικονομικές διαστάσεις, ωστόσο υπόκειται επίσης στην επίδραση διαφόρων παραμέτρων που λαμβάνονται δεόντως υπόψη στο πλαίσιο λήψης αποφάσεων. Στο παγκόσμιο πλαίσιο των προτεραιοτήτων του ενεργειακού τομέα, κατά τη διαμόρφωση των στρατηγικών που αφορούν την αξιοποίηση των λιγνιτικών αποθεμάτων και την αξιολόγηση των σχετικών επενδύσεων λαμβάνεται δεόντως υπόψη το περιβαλλοντικό κριτήριο (Katsaprakakis&Christakis, 2016).

2.2. Ο Λιγνίτης και οι Εκπομπές CO₂

Ο λιγνίτης, ένας τύπος άνθρακα χαμηλής ποιότητας, ανακαλύπτεται σε άφθονες ποσότητες μέσα στα υπόγεια στρώματα της Ελλάδας. Η εν λόγω χώρα κατέχει την αξιοσημείωτη θέση του δεύτερου μεγαλύτερου παραγωγού λιγνίτη εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενώ εξασφαλίζει επίσης την έκτη θέση σε παγκόσμια

κλίμακα όσον αφορά την παραγωγή λιγνίτη. Με βάση την ανάλυση των συνολικών αποθεμάτων και την αναμενόμενη πορεία της μελλοντικής κατανάλωσης, υποστηρίζεται ότι οι υπάρχουσες ποσότητες λιγνίτη στην Ελλάδα κρίνονται επαρκείς για να καλύψουν τη ζήτηση για μια εκτιμώμενη διάρκεια 45 ετών. Μέχρι σήμερα, η αθροιστική ποσότητα λιγνίτη που εξορύσσεται ανέρχεται σε 1,3 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους, ενώ τα δυνητικά βιώσιμα αποθέματα εκτιμώνται σε περίπου 3,1 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους. Σύμφωνα με τους Vamvuka και Galetakis (2010), η συνολική ποσότητα του εξορυγμένου υλικού το έτος 2005 ανήλθε σε 67,3 εκατομμύρια τόνους. Η χρήση του άνθρακα ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας άρχισε προς το τέλος του 19ου αιώνα. Οι αρχικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής παρουσίαζαν ένα μη βέλτιστο επίπεδο απόδοσης 1%, με αποτέλεσμα η κατανάλωση άνθρακα να ανέρχεται σε 12,3 κιλά ανά κιλοβατώρα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, συνολικά 37 κιλά διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) εκλύονταν στην ατμόσφαιρα της Γης. Αναμφίβολα, από εκείνη τη χρονική στιγμή έχουν συντελεστεί σημαντικοί μετασχηματισμοί. Η αποτελεσματικότητα των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής έχει γνωρίσει σημαντική πρόοδο, με αποτέλεσμα ο διεθνής μέσος όρος μετά το πέρασμα ενός αιώνα να έχει ανέλθει στο 31%. Οι σταθμοί που παρουσιάζουν το υψηλότερο επίπεδο εξειδίκευσης έχουν επιτύχει με επιτυχία ένα εντυπωσιακό ποσοστό 47%. Στο πλαίσιο του λιγνίτη, μιας παραλλαγής του άνθρακα που χαρακτηρίζεται από τη χαμηλότερη ποιότητά του, αξίζει να σημειωθεί ότι το αποκορύφωμα της απόδοσης που επιτεύχθηκε καταγράφηκε στο 45,3%, όπως αναφέρουν οι Agraniotis και συν. το 2012.

Στο πλαίσιο της Ελλάδας, παρατηρείται ότι ο τυπικός βαθμός απόδοσης λειτουργίας των λιγνιτικών μονάδων κυμαίνεται περίπου στην τιμή του 33%. Η αισθητά μειωμένη θερμογόνος δύναμη που παρουσιάζει ο ελληνικός λιγνίτης, ιδιαίτερα στην περίπτωση της Μεγαλόπολης, δημιουργεί αντίστοιχα μειωμένο βαθμό απόδοσης, που φτάνει σε ορισμένες περιπτώσεις το 28%. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τον μη βέλτιστο βαθμό απόδοσης των μονάδων αυτών είναι η συνακόλουθη αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Agraniotisetal., 2012).

2.3. Φαινόμενο του Θερμοκηπίου και Κλιματική Αλλαγή

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα εγγενές φαινόμενο που διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας. Η ατμόσφαιρα της Γης διευκολύνει τη μετάδοση σημαντικού μέρους του ορατού φωτός που εκπέμπεται από τον Ήλιο, επιτρέποντάς του να διεισδύσει και να φτάσει στην επιφάνεια της Γης. Η επιφάνεια της Γης, όταν εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, υφίσταται μια διαδικασία κατά την οποία απελευθερώνει ένα μέρος αυτής της ενέργειας ως υπέρυθρη ακτινοβολία. Σε αντίθεση με το ορατό φως, η συγκεκριμένη μορφή ακτινοβολίας έχει την τάση να απορροφάται από τα αέρια του θερμοκηπίου που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Κατά συνέπεια, τα αέρια αυτά εκπέμπουν στη συνέχεια την απορροφηθείσα ενέργεια προς διάφορες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα ένα μέρος της να ανακατευθύνεται προς την επιφάνεια της Γης. Το φαινόμενο αυτό συμβάλλει στη θέρμανση της γήινης επιφάνειας. Ελλείψει της θέρμανσης που αποδίδεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, έχει διατυπωθεί η άποψη ότι η μέση θερμοκρασία της Γης θα προσέγγιζε τους -18°C , όπως υποστηρίζεται από τους Kellstedt και συν. (2008).

Τα κυρίαρχα αέρια της γήινης ατμόσφαιρας, δηλαδή το άζωτο και το οξυγόνο, έχουν ελάχιστη επίδραση στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη, παρά τη σημαντική αφθονία τους. Το άζωτο αποτελεί περίπου το 78% της ξηρής ατμόσφαιρας, ενώ το οξυγόνο αντιπροσωπεύει περίπου το 21%. Αντίθετα, το φαινόμενο του θερμοκηπίου προέρχεται από μοριακές οντότητες αυξημένης πολυπλοκότητας και σημαντικά μειωμένης επικράτησης (Schuldtetal., 2011).

2.4. Διεθνείς Προσπάθειες Αντιμετώπισης της Κλιματικής Αλλαγής

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει σταθερά επιδείξει ισχυρή υποστήριξη για το Πρωτόκολλο του Κιότο από την αρχή του, καθώς έλαβε τη στρατηγική απόφαση να πρωτοστατήσει στην εμπορία εκπομπών (ETS) εντός της Κοινότητας πριν από την

επίσημη εφαρμογή του πρωτοκόλλου σε παγκόσμια κλίμακα. Η ενσωμάτωση του Πρωτοκόλλου του Κιότο στην κοινοτική νομοθεσία επιτεύχθηκε με την εφαρμογή των οδηγιών 2003/87/ΕΚ και 2004/101/ΕΚ, όπως ορίστηκαν από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 2003. Κατά την εναρκτήρια περίοδο δέσμευσης του Πρωτοκόλλου, η οποία διήρκεσε από το 2008 έως το 2012, τα κράτη που συμμετείχαν στη συμφωνία δεσμεύτηκαν να περιορίσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 5% κατά μέσο όρο σε σχέση με τα επίπεδα που καταγράφηκαν το 1990. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και οι 15 χώρες-μέλη της, που αναφέρονται ως ΕΕ-15, ξεπέρασαν την προαναφερθείσα απαίτηση υποσχόμενοι να επιτύχουν συνολική μείωση κατά 8%. Ο συλλογικός στόχος της ΕΕ για μείωση των εκπομπών κατά 8% στο πλαίσιο του Πρωτοκόλλου του Κιότο υλοποιήθηκε αποτελεσματικά μέσω της χρήσης νομικά δεσμευτικών εθνικών στόχων, οι οποίοι προσαρμόστηκαν ειδικά για να ληφθούν υπόψη οι μοναδικές δυνατότητες κάθε χώρας μέλους. Η προσέγγιση αυτή, που συνήθως αναφέρεται ως συμφωνία "κατανομής των βαρών", ενσωματώθηκε στην απόφαση με την οποία εγκρίθηκε επίσημα το Πρωτόκολλο του Kyoto (Chesneyetal., 2016). Οι προαναφερθέντες στόχοι διατυπώθηκαν σε όρους ποσοστών εκπομπών, που προέκυψαν από ένα συγκεκριμένο έτος αναφοράς, και στη συνέχεια μετατράπηκαν σε ένα οριστικό εθνικό όριο για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Το εν λόγω κατώτατο όριο ποσοτικοποιείται σε μετρικούς τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (tCO₂-eq) για το σύνολο της χρονικής περιόδου 2008-2012. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης περιόδου δέσμευσης του Πρωτοκόλλου, που εκτείνεται από το 2013 έως το 2020, η Ευρωπαϊκή Ένωση, μαζί με επιλεγμένα ευρωπαϊκά έθνη και την Αυστραλία, κατέληξε σε αμοιβαία συναίνεση για την ανάληψη πρόσθετων μέτρων με στόχο τη μείωση των εκπομπών. Σύμφωνα με τις αντίστοιχες δεσμεύσεις τους, τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, συμπεριλαμβανομένης της Ισλανδίας, κατέληξαν σε συναίνεση για τη συνεργατική επιδίωξη στόχου μείωσης κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα εκπομπών που καταγράφηκαν το 1990. Τα απαιτούμενα μέτρα για την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και τα κράτη που την απαρτίζουν προκειμένου να επιτύχουν τη δέσμευσή τους για μείωση των εκπομπών έχουν ήδη καθοριστεί μέσω της δέσμης

μέτρων για το κλίμα και την ενέργεια για το 2020, όπως περιγράφεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2020).

Η δέσμη μέτρων για το κλίμα και την ενέργεια περιλαμβάνει συμπληρωματική νομοθεσία που επιδιώκει να εγγυηθεί την τήρηση των φιλόδοξων κλιματικών και ενεργειακών στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2020:

Η δέσμη μέτρων θέτει 3 βασικούς στόχους:

- 1) μείωση κατά 20% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990
- 2) 20% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της ΕΕ
- 3) 20% της ενέργειας της ΕΕ από ανανεώσιμες πηγές (αιολική, ηλιακή, βιομάζα κ.λπ.)

Τον Απρίλιο του έτους 1998, η Ελλάδα έβαλε την υπογραφή της στο Πρωτόκολλο του Kyoto, μια διεθνή συμφωνία, μαζί με τα άλλα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σύμφωνα με τον μηχανισμό κατανομής των βαρών που περιγράφεται στο Πρωτόκολλο, το έθνος μας ανέλαβε τη δέσμευση να περιορίσει την κλιμάκωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο 25% κατ' ανώτατο όριο κατά την περίοδο 2008-2012, σε σχέση με τα επίπεδα εκπομπών που παρατηρήθηκαν το 1990. Η Ελλάδα έχει διαμορφώσει σχολαστικά ένα ολοκληρωμένο εθνικό σχέδιο με στόχο τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εντός του χρονικού πλαισίου 2000-2010. Η στρατηγική αυτή πρωτοβουλία έχει αναληφθεί με απόλυτη αφοσίωση για την εκπλήρωση των υποχρεώσεων που απορρέουν από την κύρωση του σεβαστού Πρωτοκόλλου του Κιότο, όπως τεκμηριώνεται στο ΦΕΚ 117/Α/30-5-02. Επιπλέον, η Ελλάδα έχει ευθυγραμμίσει επιμελώς τις προσπάθειές της με την αντίστοιχη συμφωνία που έχει καταρτίσει η σεβαστή Κοινότητα, όπως περιγράφεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος για το 2020. Με βάση τα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (2020) και της Eurostat (2020), από την ανάλυση του Σχήματος 9 και του Σχήματος 10 προκύπτει ότι η Ελλάδα έχει αυξήσει με επιτυχία το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 18% και έχει περιορίσει αποτελεσματικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 9,1% σε σχέση με τα επίπεδα που

καταγράφηκαν το 1990. Οι δεσμευτικοί εθνικοί στόχοι για τη χώρα μας, όπως προκύπτουν από τη δέσμη μέτρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2020, συνεπάγονται την επίτευξη ενός ποσοστού διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 18% και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 4% σε σχέση με τα επίπεδα που καταγράφηκαν το 2005.

Τον Δεκέμβριο του 2019, το Υπουργικό Συμβούλιο ενέκρινε το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (NECP), ένα ολοκληρωμένο στρατηγικό σχέδιο που εκπονήθηκε από την ελληνική κυβέρνηση για την αντιμετώπιση των κλιματικών και ενεργειακών προβλημάτων. Το σχέδιο αυτό περιγράφει έναν σχολαστικό οδικό χάρτη με στόχο την επίτευξη ανάλογων ενεργειακών και κλιματικών στόχων έως το έτος 2030. Το Ενισχυμένο Σχέδιο για τη Βιώσιμη Ενέργεια και το Κλίμα (ESRP) θεσπίζει σημαντικά πιο φιλόδοξους εθνικούς ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους έως το 2030, σε σύγκριση τόσο με το αρχικό σχέδιο ESRP όσο και με τους ενεργειακούς στόχους που θεσπίστηκαν στο πλαίσιο της Ενεργειακής Ένωσης στην κεντρική Ευρώπη (EuropeanCommission, 2020).

2.5. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας(ΑΠΕ)

Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης έχει διατυπωθεί από την Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη ως εξής: Η αειφόρος ανάπτυξη είναι ένα πρότυπο ανάπτυξης που προσπαθεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της σημερινής γενιάς, διασφαλίζοντας παράλληλα την ικανότητα των επόμενων γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες. Η προοπτική επίτευξης της αειφόρου ανάπτυξης εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα και τη βέλτιστη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πόρων, συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η γενική έννοια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνει κάθε μορφή ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αναπληρώνεται μέσω φυσικών, κυκλικών φαινομένων που διαρκούν επ' αόριστον (Oikonomouetal., 2009).

Οι καθαρές και φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες που χρησιμοποιούνται σε σημαντική κλίμακα, δεν εκπέμπουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή επικίνδυνα και ραδιενεργά απόβλητα. Η εκμετάλλευση της φυσικής ροής ενέργειας, όπως τονίζεται από τους Zhang και συν. (2018), δεν απαιτεί ενεργητικές παρεμβάσεις όπως η εξόρυξη, η άντληση και η καύση. Αντίθετα, περιλαμβάνει την αξιοποίηση της προϋπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Αυτό σημαίνει ότι οι εν λόγω πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται από την ανεξάντλητοτητά τους, καθώς προέρχονται από ποικίλα φυσικά φαινόμενα, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, τα μοτίβα του ανέμου, οι βαρυτικές δυνάμεις που δρουν στα υδάτινα σώματα, η κίνηση των κυμάτων, τα ωκεάνια ρεύματα, η οργανική ύλη που προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς και η θερμική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον φλοιό της Γης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (RES) έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν με δύο πρωταρχικούς τρόπους: άμεση αξιοποίηση, κυρίως για σκοπούς θέρμανσης, ή έμμεση αξιοποίηση μέσω μετατροπής σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας, όπως ο ηλεκτρισμός ή η μηχανική ενέργεια.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις, το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πιστεύεται ότι ξεπερνά την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας κατά ένα σημαντικό πολλαπλάσιο. Παρά την πρόσφατη εμφάνιση νέων ενεργειακών εφαρμογών, το υπέρογκο κόστος, οι προκλήσεις υλοποίησης και η περίπλοκη αλληλεπίδραση πολιτικών και οικονομικών παραγόντων εμπόδιζαν μέχρι σήμερα την αξιοποίηση ενός κλάσματος αυτού του τεράστιου δυναμικού (Ekrenietal., 2014).

Η εμφάνιση του ενδιαφέροντος για την ευρύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με την αναζήτηση αξιόπιστων και οικονομικά βιώσιμων τεχνολογιών για την αξιοποίηση του δυναμικού τους, μπορεί να αναχθεί στην αρχική πετρελαϊκή κρίση του 1979. Το ενδιαφέρον αυτό υποκινήθηκε κυρίως από τις επαναλαμβανόμενες πετρελαϊκές κρίσεις κατά την περίοδο εκείνη και έκτοτε απέκτησε δυναμική κατά την τελευταία δεκαετία, λόγω της αναγνώρισης των βαθιών παγκόσμιων περιβαλλοντικών προκλήσεων που απορρέουν από τη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας (Oikonomouetal., 2009).

Επί του παρόντος, είναι αξιοσημείωτο ότι οι παράγοντες αυτοί λαμβάνονται δεόντως υπόψη στο πλαίσιο των επίσημων ενεργειακών στρατηγικών των προηγμένων εθνών. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην πρόοδο της τεχνολογίας και στον πολλαπλασιασμό των δυνατοτήτων παραγωγής τεχνολογίας στις αναδύμενες οικονομίες, οι οποίες με τη σειρά τους έχουν οδηγήσει σε ανάλογη μείωση των δαπανών για επενδύσεις και παραγωγή. Επιπλέον, οι εν λόγω οντότητες χρησιμεύουν ως στρατηγική επιλογή για τα έθνη-κράτη λόγω του προχωρημένου σταδίου ανάπτυξής τους, των ισχυρών μέτρων ασφαλείας, της έντονης ανταγωνιστικότητας και της εγγενούς ελκυστικότητας τόσο σε ιδιώτες όσο και σε επενδυτές. Η εφαρμογή αυτών των μέτρων εξυπηρετεί την ενίσχυση των περιβαλλοντικών δεικτών, συγκεκριμένα μέσω του μετριασμού των εκπομπών CO₂ και της επίτευξης ανεξαρτησίας από το εισαγόμενο πετρέλαιο (Οικονομουetal., 2009). Ουσιαστικά, διαθέτουν την ικανότητα να αντιμετωπίσουν εύστοχα το τρίπτυχο των προκλήσεων που αντιμετωπίζει η ενεργειακή βιομηχανία:

- Επάρκεια αποθεματικών
- Ασφάλεια εφοδιασμού
- Ασφάλεια εφοδιασμού Ασφάλεια εφοδιασμού Ασφάλεια εφοδιασμού Ασφάλεια εφοδιασμού Ασφάλεια εφοδιασμού (Cho&Kim, 2015).

Ο πολλαπλασιασμός των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη διεθνή ενεργειακή αγορά έχει επιταχυνθεί λόγω της δυνατότητάς τους να ενισχύσουν την ενεργειακή αυτονομία των μικρών και αναδύμενων κρατών, λειτουργώντας ως βιώσιμο υποκατάστατο της επικρατούσας πετρελαιοκεντρικής οικονομίας. Είναι προφανές ότι τα έθνη που διαθέτουν σημαντικά αποθέματα πρωτογενών πηγών ενέργειας συχνά αξιοποιούν αυτό το πλεονέκτημα για να ασκούν πολιτική και οικονομική κυριαρχία έναντι άλλων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που μπορούν να προσφέρουν σε μια οικονομία αφορά την ενίσχυση της απασχόλησης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν αξιοσημείωτες δυνατότητες στον τομέα της δημιουργίας και της διατήρησης της απασχόλησης. Η μελέτη για τη βιομάζα που διεξήχθη από το Παγκόσμιο Ταμείο για τη Φύση (WWF) αποκαλύπτει ένα αξιοσημείωτο δυναμικό απασχόλησης που κυμαίνεται από 170.000 έως 290.000

θέσεις πλήρους απασχόλησης στις χώρες μέλη του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD). Η εκτίμηση αυτή αφορά αποκλειστικά την αξιοποίηση της βιομάζας ως ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Σύμφωνα με τους Tambunan και συν. (2020), εκτιμάται ότι αυτές οι ευκαιρίες απασχόλησης θα προκύψουν κυρίως σε αγροτικές περιοχές που χαρακτηρίζονται από περιορισμένες υποδομές, γεγονός που τις καθιστά εξαιρετικά σημαντικές.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα έγκειται στον απλό χαρακτήρα της κατασκευής τους και στην ευκολία με την οποία μπορεί να γίνει η διαχείριση του εξοπλισμού συντήρησης. Επιπλέον, η απουσία δαπανών που σχετίζονται με τις πρώτες ύλες, σε συνδυασμό με τις ελάχιστες ανάγκες συντήρησης, έχει ως αποτέλεσμα περιορισμένο λειτουργικό κόστος. Αυτό μετριάζει αποτελεσματικά το μειονέκτημα που συνδέεται με τις κλιμακούμενες δαπάνες που συνεπάγεται η δημιουργία των εγκαταστάσεων. Επιπλέον, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστούν τα διάφορα τεχνικά πλεονεκτήματα που συνδέονται με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

- τη δυνατότητα διαφοροποίησης των ενεργειακών φορέων, των τεχνολογιών και των υποδομών για την παραγωγή θερμότητας, καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας
- αύξηση της ευελιξίας των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής ώστε να ανταποκρίνονται στη μεταβαλλόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (Tambunanetal., 2020).

Η επιλογή των ενεργειακών πόρων σε κάθε χώρα εξαρτάται από τους φυσικούς περιορισμούς που επιβάλλονται σε κάθε τύπο πόρου, όπως το υδάτινο δυναμικό, το αιολικό δυναμικό ανά μονάδα επιφάνειας, η μέγιστη μέση ηλιακή έκθεση ανά μονάδα επιφάνειας και ούτω καθεξής. Κάθε πόρος διαθέτει ένα κατώτατο όριο βέλτιστης απόδοσης, υπονοώντας έτσι ότι υπάρχει ένα βέλτιστο επίπεδο για τη χρήση κάθε πόρου (Oikonomouetal., 2009).

2.6. Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

- **Αιολική ενέργεια:** Χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. άλεση σε ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Ηλιακή Ενέργεια:** Αξιοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες), ενώ η χρήση της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με τη βοήθεια της πολιτικής προώθησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.
- **Υδροηλεκτρική ενέργεια:** Αναφέρεται στα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, τα οποία στον τομέα της ήπιας ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.
- **Βιομάζα:** Αξιοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως απόβλητα από τη βιομηχανία ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και τη βιομηχανία ζάχαρης) για την απελευθέρωση της ενέργειας που δεσμεύεται από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν δημοτικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να παράγει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, τα οποία είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον καύσιμα από τα παραδοσιακά καύσιμα. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί ευρέως στο μέλλον.
- **Γεωθερμική ενέργεια:** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Μπορεί να αξιοποιείται εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει φυσικά στην επιφάνεια, π.χ. σε θερμοπίδακες ή πηγές θερμού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιείται είτε άμεσα για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών με γεωθερμική ενέργεια.

- Ενέργεια από παλίρροιες: Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, η οποία προκαλεί άνοδο της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και προκειμένου να ανέβει ξανά αναγκάζεται να περάσει από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.
- Ενέργεια από κύματα: Αξιοποιείται η κινητική ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων.
- Ενέργεια από τους ωκεανούς: Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των στρωμάτων του ωκεανού, κάνοντας χρήση των θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας (Piekut, 2021).

2.7. Ο Ρόλος των ΑΠΕ στην Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής

Λαμβάνοντας υπόψη τον προαναφερθέντα διάλογο, καθίσταται προφανές ότι η παγκόσμια κοινότητα είναι υποχρεωμένη να υιοθετήσει βιώσιμες προσεγγίσεις προκειμένου να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες, στοχεύοντας έτσι στην αντιμετώπιση των κλιμακούμενων επιπέδων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και στη βελτίωση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν ουσιαστικά και αξιοσημείωτα στην επίτευξη του προαναφερθέντος στόχου, λόγω των σημαντικά μειωμένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, όπως τεκμηριώνεται από την έρευνα των He και συν (2023).

Η επίτευξη των στόχων που περιγράφονται στη Συμφωνία του Παρισιού απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες για τον περιορισμό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας μέσω βελτιωμένων πρακτικών ενεργειακής απόδοσης, με παράλληλη αύξηση του ποσοστού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των βιοκαυσίμων, στο ενεργειακό τοπίο. Είναι επιτακτική ανάγκη η αναλογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική τελική παροχή ενέργειας να φθάσει το ελάχιστο όριο των δύο τρίτων έως το 2050. Ταυτόχρονα, είναι επιτακτική ανάγκη να

αυξηθεί το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, ανεβάζοντάς το από 25% το 2017 στο αξιόπαινο 86% έως το 2050.

Με βάση τα τελευταία στοιχεία κόστους που παρέχονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), είναι προφανές ότι η δαπάνη που συνδέεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει σημειώσει σημαντική μείωση τα τελευταία χρόνια. Αυτή η πτωτική τάση μπορεί να αποδοθεί στην πρόοδο των τεχνολογικών δυνατοτήτων, στην υλοποίηση οικονομικών κλίμακας και στη δημιουργία ανταγωνιστικών αλυσίδων εφοδιασμού. Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν αναδειχθεί ως η πλέον οικονομικά βιώσιμη επιλογή σε όλες σχεδόν τις παγκόσμιες περιοχές. Η αυξανόμενη αλήθεια αυτής της νέας πραγματικότητας καθρεφτίζεται σταδιακά στο πεδίο των στατιστικών δεδομένων. Ως ακαδημαϊκός, είναι αξιοσημείωτο να αναφέρω ότι ένα σημαντικό ποσοστό 72% των νέων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας σε όλο τον κόσμο μπορεί να αποδοθεί στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), το 2020 υπήρξε σημαντική μείωση του παγκόσμιου σταθμισμένου μέσου ισοσταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE) σε διάφορες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα φωτοβολταϊκά παρουσίασαν αξιοσημείωτη μείωση κατά 82%, ενώ τα ηλιοθερμικά συστήματα (CSP) σημείωσαν μείωση κατά 47%. Η χερσαία αιολική ενέργεια σημείωσε επίσης αξιοσημείωτη μείωση κατά 39%, ενώ η υπεράκτια αιολική ενέργεια σημείωσε συγκριτικά μικρότερη μείωση κατά 29%. Τα ευρήματα αυτά αναδεικνύουν τις σημαντικές μειώσεις του κόστους που επιτεύχθηκαν στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεταξύ 2010 και 2019.

Η υιοθέτηση καθαρών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με την πρόοδο της ηλεκτροκίνησης και τη μείωση του κόστους, έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την ποιότητα του αέρα των πόλεων και στη συνέχεια να προωθήσει τη δημόσια υγεία. Τα εξέχοντα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τον μετριασμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την επακόλουθη ενίσχυση της δημόσιας υγείας είναι πράγματι αξιοσημείωτα. Τα εκτιμώμενα συνολικά οικονομικά οφέλη που προκύπτουν

από την ενίσχυση των αποτελεσμάτων της υγείας, τη μείωση των επιδοτήσεων και τη βελτίωση της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να φτάσουν το εντυπωσιακό ποσό των 160 τρισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ εντός τριών δεκαετιών. Συνοπτικά, μπορεί να συναχθεί ότι κάθε νομισματική μονάδα που διατίθεται για τη μετατροπή της παγκόσμιας ενεργειακής υποδομής αποδίδει από 5 έως πάνω από 7 δολάρια, ανάλογα με την αποτίμηση των εξωτερικών παραγόντων (Oikonomouetal., 2009).

3. Υβριδικά Συστήματα

Η εγγενής στοχαστικότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θέτει περιορισμούς στην ανεξάρτητη χρήση τους στο πλαίσιο αυτόνομων ενεργειακών συστημάτων. Τα υβριδικά συστήματα ενέργειας συγχωνεύουν πολλαπλά ενεργειακά συστήματα για να ξεπεράσουν αυτόν τον περιορισμό, περιλαμβάνοντας συχνά μια συγχώνευση ορυκτών καυσίμων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που συμπληρώνεται από τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ή συστήματα υδρογόνου. Τα προαναφερθέντα αποτελέσματα οδηγούν σε μείωση των δαπανών που σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αντίθεση με ένα σύστημα που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, ενώ ταυτόχρονα εγγυώνται την αδιάλειπτη παροχή συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Zohuri, 2018).

Τα υβριδικά συστήματα παραγωγής έχουν επιδείξει αξιοσημείωτη αποτελεσματικότητα όταν χρησιμοποιούνται σε αυτόνομη λειτουργία εντός γεωγραφικά απομονωμένων και αραιοκατοικημένων περιοχών. Στο συγκεκριμένο σενάριο, οι συμβατικοί ενεργειακοί πόροι και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται ως μέτρο έκτακτης ανάγκης για να εγδυθούν την εκπλήρωση των ενεργειακών απαιτήσεων κατά τις περιόδους που οι ανανεώσιμοι πόροι δεν είναι προσβάσιμοι. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί δυνητικά να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο, όπως συζητείται από τους Paska και συν. (2009). Ως εκ τούτου, μπορεί να υποστηριχθεί ότι τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν αυξημένο επίπεδο αξιοπιστίας σε αντίθεση με τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όταν λειτουργούν αυτόνομα. Τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκουν πιθανές εφαρμογές σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως ενδεικτικά σε εκπαιδευτικά ιδρύματα, εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης, βιομηχανικά συγκροτήματα και παρόμοιες εγκαταστάσεις. Στο συγκεκριμένο σενάριο, όπου οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο, το σύστημα αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις απαιτήσεις φορτίου αντλώντας ενέργεια από το δίκτυο και

ταυτόχρονα αναπληρώνοντας τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε περιόδους που χαρακτηρίζονται από αυξημένες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, το σύστημα διαχειρίζεται αποτελεσματικά το φορτίο χρησιμοποιώντας τους εσωτερικούς του πόρους και στη συνέχεια αξιοποιεί την πλεονάζουσα ενέργεια πουλώντας την πίσω στο δίκτυο. Με την εφαρμογή της προαναφερθείσας προσέγγισης, τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν ανώτερες οικονομικές επιδόσεις σε αντίθεση με τα συστήματα που βασίζονται αποκλειστικά σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση υβριδικών συστημάτων παρουσιάζει πολλά οφέλη, όπως η ενίσχυση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ο μετριασμός του ενεργειακού κόστους (COE), η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η διευκόλυνση της πρόσβασης στην ηλεκτρική ενέργεια σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές. Τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα ευθυγραμμίζονται με τις θεμελιώδεις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης, που περιλαμβάνουν την οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική διάσταση (Branicky, 2005).

3.1. Εφαρμογές Υβριδικών Συστημάτων

3.1.1. Υβριδικά Συστήματα Παραγωγής Διασυνδεδεμένα σε Κεντρικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα κεντρικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν τα πολύπλευρα στοιχεία των συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι η εξάρτησή τους από το εναλλασσόμενο ρεύμα, όπου η τάση και η συχνότητα παραμένουν ανεπηρέαστες από την εισαγωγή συμπληρωματικών γεννητριών ή φορτίων. Στην ουσία, τα εν λόγω δίκτυα μπορούν να χαρακτηριστούν ως αέναα ισορροπημένες οντότητες (Yanine&Sauma, 2013). Όταν ένας υβριδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται με ένα δίκτυο, αναφέρεται ως διασυνδεδεμένη παραγωγή. Δεδομένου ότι το κεντρικό δίκτυο αναλαμβάνει την ευθύνη του ελέγχου

της τάσης και της συχνότητας, καθώς και την παραγωγή άεργου ισχύος, ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος καθίσταται λιγότερο πολύπλοκος, καθώς αποφεύγεται η ανάγκη για πρόσθετα συστήματα ελέγχου. Όταν η ζήτηση ενέργειας υπερβαίνει τη δυναμικότητα παραγωγής του σταθμού, το έλλειμμα ισχύος αντισταθμίζεται με άντληση ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο (Boukettaya&Krichen, 2014).

Με παρόμοιο τρόπο, αξίζει να αναφερθεί ότι η πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται από το υβριδικό σύστημα έχει τη δυνατότητα να αφομοιωθεί από το δίκτυο. Ωστόσο, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωρισθεί ότι υπάρχουν περιορισμοί στην εμπλοκή του υβριδικού σταθμού στην άμεση διαδικασία παραγωγής ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η συνύπαρξη του υβριδικού σταθμού επηρεάζει την ικανότητα του κύριου δικτύου να διατηρεί σταθερή τάση και συχνότητα, με αποτέλεσμα την ευπάθεια του δικτύου. Κατά συνέπεια, συνήθως απαιτούνται συμπληρωματικές συσκευές και μηχανισμοί ελέγχου για να μετριαστεί αυτό το αποτέλεσμα (Paskaetal., 2009).

3.1.2. Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα (Μη Διασυνδεδεμένα)

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα εξυπηρετούν τον σκοπό της ηλεκτροδότησης απομακρυσμένων περιοχών που δεν έχουν συνδεσιμότητα με το πρωτεύον ηλεκτρικό δίκτυο, βασιζόμενα έτσι αποκλειστικά σε ένα σύστημα διανομής και όχι σε ένα σύστημα μεταφοράς. Ο πρωταρχικός στόχος της μετατροπής ενός συμβατικού αυτόνομου σταθμού σε υβριδικό σταθμό είναι ο μετριασμός της κατανάλωσης καυσίμου και η ελαχιστοποίηση των ωρών λειτουργίας των συμβατικών γεννητριών. Η πρωταρχική διάκριση μεταξύ ενός αυτόνομου και ενός διασυνδεδεμένου υβριδικού συστήματος έγκειται στην επιτακτική ικανότητά του να παρέχει το σύνολο των ενεργειακών απαιτήσεων σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή ή να διακόπτει το φορτίο όταν η παροχή αυτή καθίσταται ανέφικτη. Επιπλέον, είναι επιτακτική ανάγκη το σύστημα να διαθέτει την ικανότητα αποτελεσματικού ελέγχου της συχνότητας και παραγωγής άεργου ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης του δικτύου. Σε περιπτώσεις όπου η ηλεκτρική παραγωγή που παράγεται από τις μονάδες

Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) υπερβαίνει το φορτίο του συστήματος, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη αποτελεσματικής διαχείρισης της πλεονάζουσας ενέργειας για την αποφυγή ενδεχόμενης αποσταθεροποίησης εντός του συστήματος. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη είτε να αποθηκευτεί η πλεονάζουσα ενέργεια είτε να διαχυθεί με ελεγχόμενο τρόπο.

Τα αυτόνομα δίκτυα, λόγω του εγγενούς σχεδιασμού τους, δεν διαθέτουν ανεξάντλητη ικανότητα ανάληψης του φορτίου, γεγονός που τα καθιστά ευάλωτα σε σημαντικές επιδράσεις από την ενσωμάτωση συμπληρωματικών φορτίων ή γεννητριών. Λόγω των προαναφερθέντων λογικών, η πλειονότητα των αυτόνομων συστημάτων ενσωματώνει συσκευές αποθήκευσης ενέργειας παράλληλα με συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου (Martinez-Bolañosetal., 2020).

3.1.3. Τροφοδότηση Απομονωμένων Φορτίων ή Φορτίων Ειδικού Σκοπού

Τα υβριδικά συστήματα εκτός δικτύου έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ενέργεια σε απομονωμένα ή εξειδικευμένα φορτία, καλύπτοντας τόσο το συνεχές ρεύμα (DC) όσο και το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), και ενδεχομένως ικανοποιώντας απαιτήσεις μεταβλητής τάσης και συχνότητας. Ενδεικτικές περιπτώσεις τέτοιων φορτίων περιλαμβάνουν ηλεκτρικούς φάρους, φωτισμό σηματοδότησης αυτοκινητοδρόμων, άντληση νερού, συστήματα αφαλάτωσης και ηλεκτρικούς μύλους. Μια πιθανή χρήση ενός τέτοιου συστήματος θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ σε συνδυασμό με μπαταρίες και ηλεκτρονικά ισχύος. Εντός των ορίων αυτών των συγκεκριμένων συστημάτων, αξίζει να αναφερθεί ότι οι πρωταρχικές παράμετροι σχεδιασμού δεν περιστρέφονται γύρω από τον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης, ούτε δίνουν προτεραιότητα στη διαχείριση της περίσσειας ισχύος. Επιπλέον, μπορεί κανείς να εξετάσει τη χρήση μιας παραδοσιακής γεννήτριας που λειτουργεί όταν η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) δεν καλύπτει την απαιτούμενη ισχύ. Ωστόσο, συνήθως δεν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις γεννήτριες ΑΠΕ (Sawleetal., 2018).

4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μελετών και Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Η χρήση των φωτοβολταϊκών πάνελ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει γνωρίσει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι δεν έχει ακόμη εξακριβωθεί με ακρίβεια ο συνολικός προσδιορισμός των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με αυτή την τεχνολογία. Σημαντικές πρόοδοι επιτυγχάνονται επί του παρόντος στη συγκεκριμένη πορεία, που διευκολύνεται κυρίως από τη χρήση υπολογιστικών μεθοδολογιών όπως η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA). Η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των φωτοβολταϊκών πλαισίων πραγματοποιείται με την Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, όπου τα σημαντικά στάδια του κύκλου ζωής τους που παρουσιάζουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι κυρίως τα στάδια κατασκευής και εγκατάστασης. Στη συνέχεια, διενεργούνται τεχνοοικονομικές αναλύσεις για την εκτίμηση της δυνατότητας εφαρμογής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, με στόχο την εξακρίβωση της σκοπιμότητας εγκατάστασής του και της μετέπειτα λειτουργίας του. Ένας σημαντικός όγκος βιβλιογραφίας, τόσο στην εγχώρια όσο και στη διεθνή βιβλιογραφία, περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό μελετών αξιολόγησης κύκλου ζωής που αφορούν φωτοβολταϊκά συστήματα (Odeh&Cockerill, 2008).

4.1. Διεθνώς

Σύμφωνα με τα ευρήματα του MartinPehnt, ενός ατόμου που ανέλαβε μια σειρά από αξιολογήσεις κύκλου ζωής που αφορούν διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, διεξήχθη συγκριτική ανάλυση μεταξύ των εν λόγω πηγών καθώς και διαφόρων συμβατικών πηγών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση των φωτοβολταϊκών, η εφαρμογή της μεθοδολογίας αποκάλυψε μια αξιοσημείωτη μείωση του φαινομένου

του θερμοκηπίου κατά 20%. Η μείωση αυτή προέρχεται κυρίως από τη διαδικασία κατασκευής της σιλικόνης που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω της σταδιακής βελτίωσης των τεχνικών παραγωγής, της ποιότητας των υλικών και της ενεργειακής απόδοσης, τα προαναφερθέντα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να αποδώσουν μείωση έως και 50% σε όλους τους περιβαλλοντικούς δείκτες (Pehnt, 2006).

Τα ευρήματα της έρευνας του NeilsJungbluth, η οποία επικεντρώθηκε στην ανάλυση του κύκλου ζωής των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων χρησιμοποιώντας την ελβετική βάση δεδομένων ecoinvent, φαίνεται να ευθυγραμμίζονται με τα προαναφερθέντα δεδομένα. Σε αντίθεση με την πλειονότητα των ερευνητικών προσπαθειών, η έρευνα του Jungbluth επικεντρώθηκε ειδικά στην εγχώρια ενεργειακή σύνθεση δώδεκα διαφορετικών εγκαταστάσεων, με σκοπό την επίτευξη μιας πιο ολοκληρωμένης κατανόησης των επιπτώσεων τόσο στην οικονομία όσο και στο περιβάλλον. Με βάση τα ευρήματα, είναι προφανές ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφόρων αγορών όσον αφορά την ποιότητα των πρώτων υλών, τις μεθόδους εξόρυξης, το επίπεδο τεχνολογίας, τις μεθόδους επεξεργασίας, τις μεθόδους κατασκευής και άλλους συναφείς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα ποσοστά μείωσης, τα οποία συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 30-50%. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά παρατηρούνται μικρές διαφορές μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών κρυστάλλων. Παρ' όλα αυτά, είναι επιτακτική ανάγκη να τονιστεί η αναγκαιότητα πρόσθετης έρευνας στον τομέα αυτό, όπως τονίζεται από τους Jungbluth και συν. (2004).

Στην ολοκληρωμένη ανάλυσή τους, οι αξιόλογοι μελετητές V.M. Fthenakis και H.C. Kim προβαίνουν σε μια σχολαστική αξιολόγηση του κύκλου ζωής διαφόρων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών. Ειδικότερα, εισάγουν μια διάσταση που προκαλεί προβληματισμό, αξιολογώντας τον κίνδυνο που συνδέεται με αυτές τις τεχνολογίες όσον αφορά τα πιθανά ατυχήματα. Με βάση τα ευρήματά τους, οι κύριοι συντελεστές των εκπομπών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αποδίδονται στη χρήση ενέργειας που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα

για την παραγωγή των υλικών που απαιτούνται για τη συναρμολόγηση του PV συστήματος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι εν λόγω εκπομπές παρουσιάζουν φυσικές διακυμάνσεις σε διάφορες χώρες. Στο επόμενο τμήμα της μελέτης, δηλαδή στην ανάλυση κινδύνου, είναι προφανές ότι οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες παρουσιάζουν σημαντικά μειωμένα ατυχήματα ή/και θανάτους. Τα ευρήματα αυτής της ανάλυσης προέκυψαν από μια εκτεταμένη σειρά πρόσθετων στατιστικών αναλύσεων, που καλύπτουν ένα χρονικό διάστημα από το 1969 έως το 2000. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν μέσω της διαδικασίας κανονικοποίησης των δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες όπως ο αριθμός των εργαζομένων που απασχολούνται, η σοβαρότητα των ατυχημάτων, το κόστος αποζημίωσης και παρόμοιες μεταβλητές (Fthenakis&Kim, 2011).

4.1.1. Μελέτες Αυτόνομων Υβριδικών Συστημάτων

Η μελέτη που διεξήχθη από τους Shaahid και Elhadidy (2003) επικεντρώθηκε στην εξέταση της εφαρμογής ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συγκεκριμένα ενός συνδυασμού φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και μιας γεννήτριας ντίζελ. Στόχος ήταν να αντιμετωπιστούν οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός τυπικού νοικοκυριού στη Σαουδική Αραβία. Η εκτιμώμενη ετήσια ενεργειακή ζήτηση του εν λόγω κτιρίου ανέρχεται σε 35.200 κιλοβατώρες ετησίως. Τα εξεταζόμενα σενάρια υβριδικού συστήματος περιλαμβάνουν μια ποικίλη σειρά φωτοβολταϊκών πάνελ και συστοιχιών, ενσωματωμένα με μονάδες αποθήκευσης μπαταριών και μια συμπληρωματική γεννήτρια ντίζελ. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι στο πλαίσιο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με έκταση 225 τετραγωνικών μέτρων και χωρητικότητα μπαταρίας 12 ωρών, η γεννήτρια ντίζελ πρέπει να μπορεί να τροφοδοτεί το 9% του συνολικού φορτίου. Στο σενάριο ενός συστήματος χωρίς μπαταρίες, είναι επιτακτική ανάγκη η γεννήτρια ντίζελ να καλύπτει το 58% του συνολικού φορτίου.

Στη μελέτη τους, οι Shaahid και συν. (2007) χρησιμοποίησαν το λογισμικό HOMER για να αξιολογήσουν την τεχνοοικονομική βιωσιμότητα ενός υβριδικού

συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα απομονωμένο χωριό που βρίσκεται στη βορειοανατολική περιοχή της Σαουδικής Αραβίας. Το εν λόγω χωριό είχε ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 13.244 MWh. Τα ευρήματα της έρευνας δείχνουν ότι μια υβριδική διαμόρφωση που περιλαμβάνει ένα αιολικό πάρκο ονομαστικής ισχύος 3,6MW (αποτελούμενο από έξι ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη 600kW), σε συνδυασμό με ένα σύστημα ντίζελ 4,5MW (αποτελούμενο από τρεις γεννήτριες ντίζελ 1,5MW) και ένα σύστημα αποθήκευσης μπαταριών (με μέση ικανότητα κάλυψης φορτίου 30 λεπτών), επιτυγχάνει ποσοστό διείσδυσης αιολικής ενέργειας 24%. Το εκτιμώμενο κόστος παραγωγής ενέργειας του προαναφερθέντος υβριδικού συστήματος είναι 0,078 δολάρια ανά κιλοβατώρα, με την παραδοχή ότι η τιμή του καυσίμου ντίζελ είναι 0,1 δολάρια ανά λίτρο.

Η τεχνοοικονομική σκοπιμότητα ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διερευνήθηκε από τους Shaahid και Elhadidy (2007). Το σύστημα περιελάμβανε γεννήτριες φωτοβολταϊκών/ντίζελ/συμπυκνωτές και αποσκοπούσε στην κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός τυπικού εμπορικού κτιρίου που βρίσκεται στην πόλη Dhahran της Σαουδικής Αραβίας. Το κτίριο είχε ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 620.000 kWh. Η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού HOMER. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι μια υβριδική διαμόρφωση που περιλαμβάνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ονομαστικής ισχύος 80 kW, γεννήτριες ντίζελ ονομαστικής ισχύος 175 kW και μπαταρίες με δυνατότητα αυτονομίας 3 ωρών, παρουσιάζει ποσοστό διείσδυσης της ηλιακής ενέργειας 26%. Επιπλέον, το κόστος ενέργειας (COE) για το συγκεκριμένο σύστημα υπολογίζεται σε 0,149 \$/kWh, με την παραδοχή ότι η τιμή του καυσίμου ντίζελ είναι 0,1 \$/L. Η παρατηρούμενη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) ανέρχεται στο αξιοσημείωτο 27% σε σύγκριση με το υποθετικό σενάριο όπου οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται αποκλειστικά από γεννήτριες ντίζελ. Τα ευρήματα των ερευνητών υποδηλώνουν ότι η υιοθέτηση του συγκεκριμένου συστήματος έχει τη δυνατότητα να εκπληρώσει αποτελεσματικά τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου, μειώνοντας ταυτόχρονα τα έξοδα που σχετίζονται με τις γεννήτριες ντίζελ, με τρόπο που ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (Shaahid&Elhadidy, 2007).

Η μελέτη που διεξήχθη από τους Shaahid και συν. (2014) επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της τεχνικοοικονομικής βιωσιμότητας της ενσωμάτωσης ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας που αποτελείται από τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, ντίζελ και μπαταριών. Ο στόχος ήταν να προσδιοριστεί η ικανότητα του συστήματος να ικανοποιεί τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας τυπικής κατοικίας, η οποία παρουσιάζει ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 35120 kWh. Η έρευνα διεξήχθη με τη χρήση της πλατφόρμας λογισμικού HOMER και περιλαμβάνει πέντε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές εντός του Βασιλείου της Σαουδικής Αραβίας. Οι καθορισμένες γεωγραφικές περιοχές περιλαμβάνουν την Abha στη νότια επαρχία, το Hofuf στην ανατολική επαρχία, το Qurayat στη βόρεια επαρχία, το Taif στη δυτική επαρχία και το Riyadh στην κεντρική επαρχία. Τα ευρήματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η χρήση ενός υβριδικού συστήματος που αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση 4 kWp σε συνδυασμό με δύο γεννήτριες ντίζελ συνολικής ισχύος 10 kW, μαζί με ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας από μπαταρία με αυτονομία 3 ωρών, αποδίδει συνολική διείσδυση ανανεώσιμης ενέργειας 22%, 21%, 22%, 20% και 20% για τις αντίστοιχες περιοχές Abha, Hofuf, Qurayat, Taif και Riyadh. Επιπλέον, το κόστος ενέργειας (COE) για αυτές τις τοποθεσίες προσδιορίζεται σε 0,179 \$/kWh, 0,179 \$/kWh, 0,178 \$/kWh, 0,180 \$/kWh και 0,181 \$/kWh, αντίστοιχα. Οι μελετητές παρατηρούν ότι το υπό εξέταση υβριδικό σύστημα παρουσιάζει αξιοσημείωτη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, η οποία ανέρχεται σε ποσοστό μείωσης 19%, σε σύγκριση με ένα σύστημα που βασίζεται αποκλειστικά σε γεννήτριες ντίζελ. Επιπλέον, η υιοθέτηση του εν λόγω υβριδικού συστήματος αποφέρει αξιοσημείωτη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, με ποσοστιαία μείωση 18%. Οι προαναφερθείσες μελέτες που διεξήχθησαν από τους Shaahid και Elhadidy (2003), Shaahid και συν. (2007) και Shaahid και συν. (2014) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σε αιολικά ή φωτοβολταϊκά συστήματα οδηγεί σε μείωση της εξάρτησης από την κατανάλωση ντίζελ, όπως υποδεικνύουν οι Rajbongshi και συν. (2017). Στο θεμελιώδες έργο τους, οι Fadaeenejad και συν. (2013) παρείχαν μια εξαντλητική εξέταση των αυτόνομων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν εφαρμοστεί σε παγκόσμια κλίμακα, με ιδιαίτερη έμφαση στο πλαίσιο της Μαλαισίας. Επιπλέον, οι

ερευνητές ανέλαβαν μια σχολαστική μελέτη περίπτωσης για να διερευνήσουν την πρακτική εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος για την αντιμετώπιση των ενεργειακών απαιτήσεων του χωριού KampungOrag. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το λογισμικό iHOGA για να πραγματοποιήσουν προσομοίωση του συστήματος, το οποίο, με βάση τα ευρήματα της έρευνας, περιλαμβάνει φωτοβολταϊκές συστοιχίες, ανεμογεννήτριες και μπαταρίες. Από την προσομοίωση προέκυψε ένα ισοσταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (COE) που κυμαίνεται από 0,29 έως 0,32 \$/kWh. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή είναι τριπλάσια από εκείνη του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στην αντίστοιχη χώρα.

Η μελέτη που διεξήχθη από τους Hiendro και συν. (2013) επικεντρώθηκε στην τεχνοοικονομική ανάλυση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που σχεδιάστηκε για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του απομακρυσμένου χωριού Temajuk, που βρίσκεται στην Ινδονησία. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το λογισμικό HOMER για να πραγματοποιήσουν προσομοίωση του συστήματος, όπου εκτίμησαν διάρκεια ζωής του έργου 25 έτη και ποσοστό μείωσης 3%. Τα εμπειρικά ευρήματα δείχνουν ότι η βέλτιστη διαμόρφωση για την επίτευξη ανώτερης οικονομικής απόδοσης περιλαμβάνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ονομαστικής ισχύος 1 κιλοβάτ (kW), το οποίο συμπληρώνεται από ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 2 kW. Επιπλέον, ένας αντιστροφείας με ισχύ εξόδου 0,7 kW και μια τράπεζα μπαταριών που αποτελείται από 15 μονάδες θεωρούνται βασικά στοιχεία αυτού του συνόλου. Το μη συμμετοχικό κόστος (NPC) που σχετίζεται με αυτό το αυτόνομο υβριδικό σύστημα ανέρχεται σε 30.921 δολάρια, ενώ το κόστος ενέργειας (COE) εκτιμάται σε 0,751 δολάρια ανά κιλοβατώρα (kWh). Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα αυτό είναι ικανό να καλύψει επαρκώς τις απαιτήσεις του ενεργειακού φορτίου. Οι ερευνητές παρατηρούν ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παρουσιάζουν ευνοϊκότερη σχέση κόστους προς ενέργεια ανά κιλοβατώρα σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες αντίστοιχης ονομαστικής ισχύος.

Η οικονομική σκοπιμότητα ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελείται από

φωτοβολταϊκά/ντίζελ/μπαταρία, διερευνήθηκε από τους Kumar και Manoharan (2014). Η μελέτη αυτή επικεντρώθηκε σε μια συγκεκριμένη περιοχή της Ινδίας, όπου η διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο περιορίζεται σε 10 ώρες την ημέρα. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το λογισμικό HOMER για να διακρίνουν τις πιο τεχνικοοικονομικά βιώσιμες λύσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε έξι διαφορετικές κλιματικές ζώνες, προσδιορίζοντας έτσι τη βέλτιστη τοποθεσία για την εφαρμογή υβριδικών συστημάτων στην περιοχή TamilNadu. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι οι κλιματικές συνθήκες στην περιοχή Kanyakumari είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για την εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος. Η βέλτιστη διαμόρφωση για τιμές καυσίμων 0,5 \$ ανά λίτρο και 0,64 \$ ανά λίτρο αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία 30 kW, μια γεννήτρια ντίζελ 30 kW, έναν μετατροπέα 20 kW και 20 μπαταρίες. Επιπλέον, περιλαμβάνει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία 35 kW, μια γεννήτρια ντίζελ 34 kW, έναν μετατροπέα 25 kW και 25 μπαταρίες. Το εκτιμώμενο κλάσμα ανανεώσιμης ενέργειας (RF) ανέρχεται σε 65%, ενώ το καθαρό παρόν κόστος (NPC) παρουσιάζει μείωση κατά 24,27 δολάρια σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα ντίζελ.

4.2. Στην Ελλάδα

Στον ελληνικό τομέα, φαίνεται ότι τα ευρήματα της έρευνας ευθυγραμμίζονται με την άποψη ότι οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τα φωτοβολταϊκά αντιμετωπίζονται κατά τη φάση της κατασκευής τους, ιδίως κατά την κατασκευή των κυψελών, φθάνοντας σε ένα δυνητικό μέγεθος 79,2%. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των διαφόρων κρυσταλλικών τεχνολογιών από αυτή την άποψη.

Η επικρατούσα συναίνεση της επιστημονικής κοινότητας επιβεβαιώνει ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν σημαντικά μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα και τις συμβατικές πηγές ενέργειας, τοποθετώντας τα έτσι ως μία από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις. Ο ισχυρισμός αυτός βρίσκει πρόσθετη επιβεβαίωση στο

επιστημονικό έργο του Α. Παπανδρέα, του οποίου τα εμπειρικά ευρήματα καταδεικνύουν θετική συσχέτιση μεταξύ της παρουσίας συμβατικών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας και των αυξημένων επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Επιπλέον, η έρευνα του Παπανδρέα αποκαλύπτει μια επίμονη ανοδική τάση στα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία συμπίπτει με την ταυτόχρονη αύξηση του επιπολασμού των ασθενειών που σχετίζονται με αυτό το επιβλαβές φαινόμενο (Lee&Jepson, 2021). Ένα ζήτημα σημαντικής σημασίας ανακύπτει σε σχέση με την εκσκαφή εκσκαφών με σκοπό την απόκτηση καυσίμων για τις συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής. Το ζήτημα αυτό έχει, σε ορισμένες περιπτώσεις, καταστήσει αναγκαία τη μετεγκατάσταση οικισμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα αυτό δεν εκδηλώνεται στο πλαίσιο των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Η διάκριση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην ελάχιστη ποσότητα υλικού που απαιτείται για τη λειτουργία τους, καθώς και στην αξιοποίηση της σχεδόν απεριόριστης πηγής ενέργειας που είναι ο ήλιος (Baniasetal., 2020).

Συνοψίζοντας, το συλλογικό σώμα των ερευνών συμφωνεί ομοιόμορφα ότι ο τομέας των φωτοβολταϊκών έχει σημειώσει αξιοσημείωτες εξελίξεις το τελευταίο διάστημα, οι οποίες συμπίπτουν με μια αυξημένη συνείδηση για τη διατήρηση του περιβάλλοντος. Οι εξελίξεις αυτές περιλαμβάνουν μια ολοκληρωμένη βελτίωση των διαφόρων πτυχών αυτής της τεχνολογίας. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι στον τομέα αυτό εξακολουθούν να υπάρχουν άφθονες ευκαιρίες για περαιτέρω βελτίωση, ιδίως όσον αφορά την αποδοτικότητα της παραγωγής (Lee&Jepson, 2021).

Σε σχέση με την τεχνοοικονομική αξιολόγηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, τα διαθέσιμα στοιχεία από την Ελλάδα, μέχρι το 2012, δείχνουν μια αξιοσημείωτη πρόοδο των φωτοβολταϊκών στο πεδίο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πράγματι, είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι η εγκατεστημένη ισχύς που προέρχεται από φωτοβολταϊκά παρουσίασε σχεδόν τριπλάσια αύξηση το έτος 2010 σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, το 2009. Ο εξορθολογισμός των αδειοδοτικών και γραφειοκρατικών διαδικασιών έχει οδηγήσει σε αυξημένη αποδοτικότητα στον τομέα της τεχνολογίας και των συστημάτων, οδηγώντας σε συνεχή βελτίωση της απόδοσής τους και ταυτόχρονη μείωση του κόστους.

Ταυτόχρονα, παρέχεται πληθώρα επενδυτικών κινήτρων, συμπεριλαμβανομένων ενδεικτικά των εγγυημένων τιμών πώλησης και των επιδοτήσεων, για τη διευκόλυνση της προώθησης και της διάδοσης των εν λόγω κινήτρων (Dongetal., 2021).

Με βάση εκτεταμένη έρευνα που διεξήχθη σχετικά με την ανάπτυξη σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ισχύος έως 100 kW, διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση των μεγαλύτερων φωτοβολταϊκών συστημάτων που ξεπερνούν το όριο των 100 kW, το ισχύον θεσμικό πλαίσιο υπαγορεύει μειωμένες εγγυημένες τιμές αγοράς ενέργειας. Κατά συνέπεια, αυτό οδηγεί σε ανάλογη μείωση των εισερχόμενων ταμειακών ροών ανά παραγόμενη μεγαβατώρα (MWh), σε σύγκριση με τα συστήματα μικρότερης κλίμακας. Οι επενδύσεις σε μικρότερα συστήματα παρουσιάζουν αυξημένους εσωτερικούς συντελεστές απόδοσης (IRR), αυξημένες αναλογίες κόστους-οφέλους και συντομότερες διάρκειες απόσβεσης κεφαλαίου. Ως αποτέλεσμα, το φαινόμενο αυτό καθιστά τις επενδύσεις σε μικρότερα συστήματα οικονομικά ευνοϊκότερες, με τον καθοριστικό παράγοντα της βιωσιμότητάς τους να υπαγορεύεται κυρίως από την τιμή πώλησης της ενέργειας (Saganietal., 2017).

Σε μια επιστημονική έρευνα που αφορούσε την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ στην οροφή ενός κτιρίου που βρίσκεται στην καρδιά της Αθήνας, εξετάστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια. Το αρχικό σενάριο περιελάμβανε την τοποθέτηση συγκεκριμένης ποσότητας πλαισίων, η οποία διευκολύνθηκε από το εξειδικευμένο πρόγραμμα που είχε οριστεί για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε στέγες. Αντίθετα, το δεύτερο σενάριο περιελάμβανε την αξιοποίηση ολόκληρου του διαθέσιμου χώρου στο μέγιστο δυνατό βαθμό, αν και χωρίς τη βοήθεια που παρείχε το προαναφερθέν πρόγραμμα. Τα ευρήματα της μελέτης δείχνουν ότι και οι δύο επιλογές διαθέτουν διαφορετικούς βαθμούς βιωσιμότητας και αποτελεσματικότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη που συνδέονται με τις εν λόγω εγκαταστάσεις δεν λήφθηκαν καν υπόψη στην ανάλυση. Επιπλέον, η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι μικρότερες εγκαταστάσεις διαθέτουν μεγαλύτερο πλεονέκτημα λόγω των ευνοϊκότερων πολιτικών τιμολόγησης (Souliotisetal., 2018).

4.3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA)

Υπό το πρίσμα της αυξανόμενης συνειδητοποίησης των περιβαλλοντικών ανησυχιών σε ένα σημαντικό τμήμα της κοινωνίας, η προσπάθεια μετριασμού των οικολογικών επιπτώσεων που συνδέονται με τη διαδικασία παραγωγής έχει καταστεί αναπόσπαστο στοιχείο των πρωτοβουλιών που αναλαμβάνουν πολλά έθνη και φορείς. Ιστορικά, η πρωταρχική εστίαση των παραγωγικών διαδικασιών ήταν η αύξηση της κερδοφορίας και η βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων. Ωστόσο, οι σύγχρονες εκτιμήσεις που περιλαμβάνουν τον μετριασμό των ρύπων και την αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στη λειτουργία των παραγωγικών οντοτήτων. Η επίτευξη σημαντικής μείωσης της παραγωγής βιομηχανικών αποβλήτων, τοξικών ουσιών και, κατά συνέπεια, αστικών αποβλήτων απαιτεί την εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης που περιλαμβάνει την αναδιαμόρφωση τόσο του σχεδιασμού των προϊόντων όσο και των φυσικών και χημικών διεργασιών. Η ενσωμάτωση όλων των περιβαλλοντικών περιορισμών στο σχεδιασμό μιας παραγωγικής διαδικασίας ή υπηρεσίας απαιτεί την υιοθέτηση μιας νέας μεθοδολογίας σχεδιασμού, όπου η αναγνώριση και ο χαρακτηρισμός των περιβαλλοντικά επιβλαβών ροών διεργασιών αποκτούν καθοριστικό ρόλο (Gerbinetetal., 2014).

Μια μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής περιλαμβάνει μια σειρά από μεθοδικές διαδικασίες που αποσκοπούν στη συλλογή και την ενδελεχή εξέταση των δεδομένων εισόδου και εξόδου που αφορούν τα ισοζύγια ενέργειας και μάζας, καθώς και τις περιβαλλοντικές συνέπειες που συνδέονται με αυτά. Οι επιπτώσεις αυτές διακρίνονται ρητά σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του υπό εξέταση συστήματος προϊόντος ή υπηρεσίας. Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής χρησιμεύει ως ένα πολύτιμο εργαλείο για την παρακολούθηση και την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής αποτελεσματικότητας που αφορά ένα δεδομένο προϊόν, μια διαδικασία ή μια δράση σε όλη τη διάρκεια ζωής του, ξεκινώντας από την ανάκτηση των πρώτων υλών έως την τελική του διάθεση, που περιλαμβάνει την ανακύκλωση, την αποτέφρωση, τη διάθεση ή ακόμη και την παραγωγή λιπασμάτων. Αυτό το εξαιρετικά ισχυρό μέσο

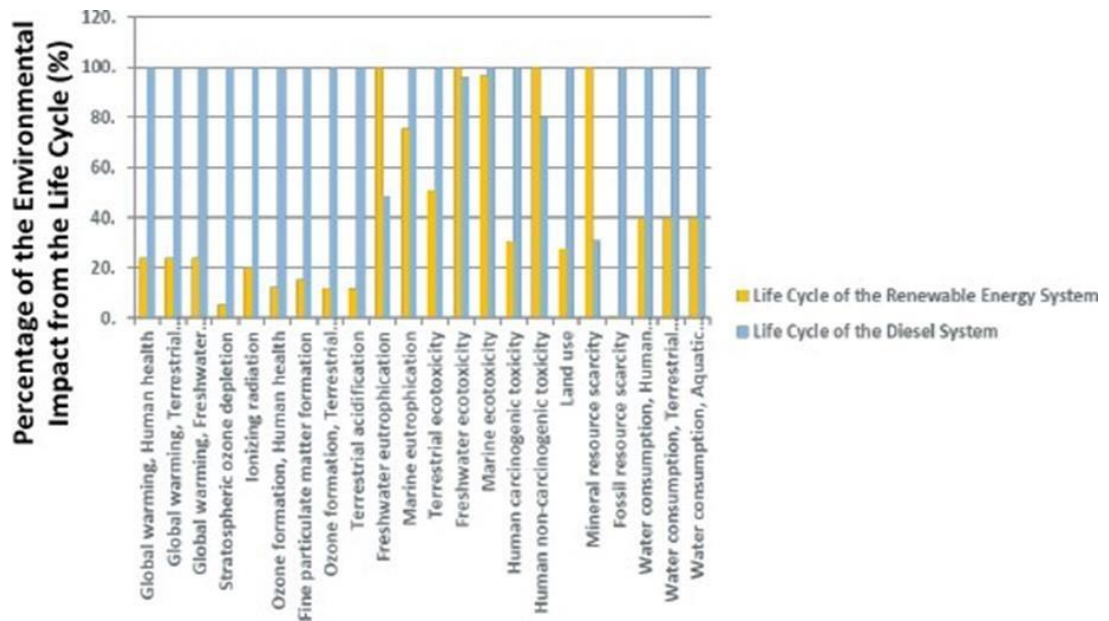
έχει την ικανότητα να διευκολύνει τη διαμόρφωση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, παρέχοντας έτσι καθοδήγηση για την ανάπτυξη και τη χρήση διαφόρων προϊόντων. Επιπλέον, βοηθά τους κατασκευαστές στη διεξαγωγή ολοκληρωμένων αναλύσεων των διαδικασιών τους, οδηγώντας σε βελτιώσεις τόσο στα προϊόντα όσο και στις διαδικασίες παραγωγής τους. Επιπλέον, απλοποιεί τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τους καταναλωτές, παρέχοντάς τους τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται για τη διάκριση μεταξύ εναλλακτικών προϊόντων (Gerbinetetal., 2014).

Η Εταιρεία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (SETAC) το 1991 παρείχε έναν ολοκληρωμένο ορισμό της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής. Η LCA είναι μια μεθοδολογική προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα συγκεκριμένο προϊόν, μια διαδικασία ή μια δραστηριότητα. Η αξιολόγηση αυτή συνεπάγεται τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση της ενέργειας και των υλικών που καταναλώνονται, καθώς και των αποβλήτων που απορρίπτονται στο περιβάλλον. Επιπλέον, η LCA περιλαμβάνει την αξιολόγηση των συνεπειών που προκύπτουν από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών, καθώς και των αποβλήτων που παράγονται. Τέλος, η LCA αποσκοπεί στον εντοπισμό και την αξιολόγηση των δυνατοτήτων περιβαλλοντικής βελτίωσης (Favaetal., 2014).

4.4. Μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)

Στη μελέτη τους, οι Shaik και συν. (2018) πραγματοποίησαν μια ολοκληρωμένη ανάλυση κύκλου ζωής ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο ενσωματώθηκε με ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που αποτελείται από υπερπυκνωτές και μπαταρίες. Στόχος ήταν να αξιολογηθεί η ικανότητα του συστήματος να ικανοποιεί τις ενεργειακές απαιτήσεις ενός απομονωμένου και μη συνδεδεμένου οικισμού στη Μαλαισία. Η LCA προσομοιώθηκε με τη χρήση του λογισμικού SimaPro, με πρωταρχικό στόχο της παρούσας έρευνας να διερευνήσει την πιθανή επισκίαση των πλεονεκτημάτων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που προκύπτουν από τη χρήση ορυκτών στην

κατασκευή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς και την επιτακτική ανάγκη για την εφαρμογή μπαταριών και υπερπυκνωτών ως μέσων αποθήκευσης. Έχει παρατηρηθεί από τους μελετητές ότι υπάρχει έλλειψη ερευνών αξιολόγησης του κύκλου ζωής που αφορούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανεπάρκεια αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη όταν εξετάζεται η συνολική ανάλυση του κύκλου ζωής και το ειδικό πλαίσιο των απομονωμένων, μη διασυνδεδεμένων εφαρμογών. Αυτή η δυσχερής κατάσταση αποτελεί πρόκληση όσον αφορά τη διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης συγκριτικής ανάλυσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε σχέση με τις εναλλακτικές λύσεις παραγωγής ενέργειας, ιδίως σε απομακρυσμένες περιοχές όπου χρησιμοποιούνται συμβατικά συστήματα ντίζελ. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να αξιολογηθούν και να κατανοηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η μελέτη περιλαμβάνει τα όρια του συστήματος, τα οποία περιλαμβάνουν τον πρωτογενή εξοπλισμό, όπως τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τις μπαταρίες και τους υπερπυκνωτές, καθώς και τον βοηθητικό εξοπλισμό, όπως τις βάσεις των Φ/Β πλαισίων, την καλωδίωση, τους μετατροπείς και τους ελεγκτές φόρτισης.



Εικόνα 1 Σύγκριση περιβαλλοντικών επιπτώσεων κύκλου ζωής μεταξύ των συστημάτων ΑΠΕ και Diesel

Τα ευρήματα της έρευνας καταδεικνύουν ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα παρουσιάζει σημαντικά μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με το σύστημα ντίζελ. Οι πρωταρχικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του οικισμού της Μαλαισίας μέσω της ηλιακής ενέργειας οφείλονται κυρίως στα στάδια εξόρυξης και κατασκευής. Οι επιπτώσεις αυτές μπορούν να βελτιωθούν με την υιοθέτηση βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων για την εξόρυξη και την επεξεργασία των πρώτων υλών, καθώς και με την ανακατεύθυνση της κατανομής των σεναρίων για το τέλος του κύκλου ζωής προς πρακτικές ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης. Η μελέτη που διεξήχθη από τους Shaik και συν. το 2018 έχει ιδιαίτερη σημασία για το συγκεκριμένο θέμα.

Η μελέτη που διεξήχθη από τους Üçtuğ και Azaragic (2018) εξέτασε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής που σχετίζονται με ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που σχεδιάστηκε για οικιακή χρήση στην Τουρκία. Το προαναφερθέν σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου και μπαταρίες ιόντων λιθίου, συγκεκριμένα με ονομαστική ισχύ 1 κιλοβάτ αιχμής για τα φωτοβολταϊκά πάνελ και αποθηκευτική

ικανότητα 2,1 κιλοβατώρες για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Η μοντελοποίηση της παραγωγής και της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε σε ωριαία βάση, λαμβάνοντας δεόντως υπόψη τα πρότυπα συμπεριφοράς των καταναλωτών σε κάθε συγκεκριμένη τοποθεσία. Τα ευρήματα δείχνουν ότι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να καλύψει περίπου το 12,5-18,4% των ετήσιων εγχώριων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, το σύστημα παράγει πλεόνασμα ενέργειας 4,7 - 8 φορές μεγαλύτερο από το ποσό που καταναλώνει. Ο κύριος συντελεστής των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του υβριδικού συστήματος είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 75% έως 81% των συνολικών επιπτώσεων. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι μπαταρίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον δείκτη "Ανθρώπινη τοξικότητα", καθώς ευθύνονται για το 66% περίπου των επιπτώσεων. Το υβριδικό σύστημα παρουσιάζει σημαντικά μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες κυμαίνονται από 1,6 έως 82,6 φορές χαμηλότερες σε σύγκριση με την ενέργεια του δικτύου.

5. Ανάλυση κόστους ζωής (LCC)

5.1. Ανάλυση των υβριδικών συστημάτων και του κόστους κύκλου ζωής στη Νιγηρία

Η χρήση του κόστους προμήθειας ως κυρίαρχου, και ενίοτε αποκλειστικού, καθοριστικού παράγοντα για την επιλογή εξοπλισμού ή συστημάτων είναι μια διαδεδομένη πρακτική, που βασίζεται κυρίως στην απλή μέτρηση της περιόδου αποπληρωμής. Η αξιοποίηση της ανάλυσης του κόστους κύκλου ζωής (LCC) είναι επιβεβλημένη προκειμένου να τεκμηριωθεί ότι η εξοικονόμηση που προκύπτει από τις λειτουργικές δραστηριότητες είναι τέτοιας κλίμακας που να δικαιολογεί επαρκώς το αρχικό κόστος επένδυσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε πολλές περιπτώσεις, το κόστος επένδυσης που απαιτείται για την επίτευξη του χαμηλότερου μακροπρόθεσμου κόστους ιδιοκτησίας υπερβαίνει εκείνο που συνδέεται με την απλή περίοδο αποπληρωμής.

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί έναν απαραίτητο ακρογωνιαίο λίθο στη σφαίρα των βασικών αγαθών που συντηρούν την καθημερινή ύπαρξη της ανθρωπότητας. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένες περιοχές της Νιγηρίας που είναι αποσυνδεδεμένες από το εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης εξακολουθούν να βασίζονται κυρίως σε γεννήτριες ντίζελ ή άλλες γεννήτριες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα ως κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, έστω και για περιορισμένη χρονική διάρκεια, που συνήθως κυμαίνεται από 5 έως 7 ώρες την ημέρα. Η πλειονότητα αυτών των γεννητριών ντίζελ παρουσιάζει την τάση να είναι υπερβολικά διαστασιολογημένες. Ενώ το αρχικό κόστος των γεννητριών ντίζελ μπορεί πράγματι να είναι σχετικά χαμηλό, είναι σημαντικό να εξεταστούν οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις, καθώς αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλότερο κόστος. Αυτό οφείλεται κυρίως στα συνεχή έξοδα που σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμων και τις απαιτήσεις συντήρησης. Στη Νιγηρία, το ισχύον κόστος του καυσίμου ντίζελ που προμηθεύεται από την

NigeriaNationalPetroleumCompanyείναι σχετικά αυξημένο, καθώς ανέρχεται σε N135 ανά λίτρο. Λαμβάνοντας υπόψη την προαναφερθείσα παρατήρηση σχετικά με το αυξημένο κόστος που συνδέεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση γεννητριών ντίζελ σε ανεξάρτητη λειτουργία, καθίσταται συνετή η διερεύνηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Όταν εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των γεννητριών που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, γίνεται φανερό ότι οι γεννήτριες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες, αναδεικνύονται ως οι βέλτιστες εναλλακτικές λύσεις. Οι γεννήτριες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζουν αυξημένες αρχικές επενδυτικές δαπάνες, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν μειωμένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης σε αντίθεση με τις συμβατικές γεννήτριες ντίζελ, όπως υποστηρίζουν οι Barringer και Barringer (2003).

Η παρούσα ανάλυση σχεδιασμού επιχειρεί να εξετάσει την προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την επιλογή εναλλακτικής δυναμικότητας παραγωγής για την ενίσχυση της παραγωγής της φωτοβολταϊκής (PV) συστοιχίας σε περιπτώσεις όπου υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των μηνιαίων απαιτήσεων του συστήματος και της μηνιαίας δυναμικότητας της PV παραγωγής. Εάν η εγκατάσταση μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας έχει σχεδιαστεί για να ικανοποιεί τις ελάχιστες απαιτήσεις διαθεσιμότητας του ήλιου, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό πλεόνασμα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια ορισμένων μηνών, με αποτέλεσμα να σπαταλιέται σημαντική ποσότητα φωτοβολταϊκής παραγωγής. Σε περιπτώσεις αυτού του είδους, συχνά αποδεικνύεται οικονομικά πιο συνετό να χρησιμοποιηθεί μια γεννήτρια ως μέσο συμπλήρωσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής κατά τη διάρκεια περιόδων που χαρακτηρίζονται από μειωμένη ΦΒ παραγωγή. Ταυτόχρονα, είναι σκόπιμο να διαστασιολογείται το φωτοβολταϊκό σύστημα κατά τρόπο ώστε να ικανοποιεί επαρκώς την πλειονότητα των ενεργειακών απαιτήσεων κατά τη διάρκεια μηνών που χαρακτηρίζονται από αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία.

Το κόστος κύκλου ζωής αναφέρεται στις συνολικές δαπάνες που συνδέονται με την ιδιοκτησία μηχανημάτων και εξοπλισμού, περιλαμβάνοντας τις δαπάνες που

προκύπτουν κατά τις φάσεις απόκτησης, λειτουργίας, συντήρησης, μετατροπής ή/και παροπλισμού. Το κόστος κύκλου ζωής αναφέρεται στις σωρευτικές οικονομικές αξιολογήσεις που περιλαμβάνουν εκτιμήσεις κόστους από την έναρξη έως τον τερματισμό του εξοπλισμού και των έργων. Οι εκτιμήσεις αυτές προκύπτουν μέσω μιας σχολαστικής αναλυτικής εξέτασης και περιλαμβάνουν την ολοκληρωμένη αξιολόγηση όλων των δαπανών που πραγματοποιούνται σε ετήσια διαστήματα καθ' όλη τη διάρκεια του έργου. Επιπλέον, οι υπολογισμοί LCC λαμβάνουν υπόψη τη διαχρονική αξία του χρήματος, εξασφαλίζοντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των οικονομικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ των παραγόντων κόστους επιτυγχάνεται όταν το συνολικό κόστος κύκλου ζωής ελαχιστοποιείται. Παρόμοια με την πλειονότητα των εργαλείων μηχανικής, το Κόστος Κύκλου Ζωής (LCC) αποδίδει βέλτιστα αποτελέσματα όταν το αμάλγαμα της μηχανικής τέχνης και της επιστήμης ενσωματώνεται αρμονικά με οξυδερκή διάκριση για την κατασκευή ενός ισχυρού σκεπτικού για την ανάληψη μιας πορείας δράσης. Προκειμένου να αξιολογηθεί αποτελεσματικά η οικονομική βιωσιμότητα των επιχειρήσεων, είναι επιτακτική ανάγκη να συμπυκνωθούν τα αποτελέσματα του Κόστους Κύκλου Ζωής (LCC) σε μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση γνωστή ως μορφή Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV). Αυτό συνεπάγεται τη συνεκτίμηση κρίσιμων παραγόντων όπως η απόσβεση, οι φόροι και η διαχρονική αξία του χρήματος (BarringerandBarringer, 2003). Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που λειτουργούν εκτός δικτύου καλύπτουν αποτελεσματικά τη ζήτηση ενέργειας με άμεσο τρόπο, παρακάμπτοντας έτσι την ανάγκη για εκτεταμένες υποδομές διανομής. Ένα υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, που αναφέρεται επίσης ως υβριδικό σύστημα, περιλαμβάνει μια συμβολή διαφορετικών αλλά αρμονικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας που αντλούν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ ενδεχομένως ενσωματώνουν έναν εφεδρικό μηχανισμό, όπως τα συγκροτήματα παραγωγής υγροποιημένου αερίου (LPG), ντίζελ ή βενζίνης. Τα υβριδικά συστήματα έχουν την ικανότητα να αφομοιώνουν τα πλεονεκτικότερα χαρακτηριστικά των επιμέρους ενεργειακών πόρων, διευκολύνοντας έτσι την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας που ανταποκρίνεται στα πρότυπα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν εύρος ισχύος από 1 κιλοβάτ (kW) έως

αρκετές εκατοντάδες κιλοβάτ (HybridPowerSystemsBasedonRenewableEnergies, 2008).

Ο πολλαπλασιασμός της υβριδικής βιβλιογραφίας προέκυψε ως απάντηση στην επιτακτική ανάγκη ενίσχυσης της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του δικτύου ενόψει της κλιμακούμενης ενσωμάτωσης σημαντικών αιολικών δυναμικών σε σχετικά μικρά αυτόνομα δίκτυα (Jacobus, 2010). Στη μελέτη τους, οι Schmid και συν. (2004) διεξήγαγαν μια ανάλυση σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα της μετατροπής σταθερών μονάδων ντίζελ σε αγροτικές περιοχές της Βραζιλίας σε μονάδες ντίζελ/μπαταρίας/φωτοβολταϊκών. Τα ευρήματα της έρευνάς τους έδειξαν ότι οι μετατροπές αυτές αποδείχθηκαν οικονομικά συμφέρουσες, ιδίως για μικρότερα συστήματα που βασίζονται σε ντίζελ και έχουν ισχύ μικρότερη από 50 kW. Στη μελέτη τους, οι Park και συν. (2001) ανέλαβαν μια άσκηση μοντελοποίησης για να εκτιμήσουν την πιθανή εξοικονόμηση κόστους που συνδέεται με τη μετατροπή του συστήματος πρόωσης ενός οχηματαγωγού από ντίζελ σε ένα συνδυασμό τεχνολογιών φωτοβολταϊκών, μπαταριών και ντίζελ. Οι Chedid και Rahman ανέπτυξαν μια εφαρμογή λογισμικού που προέβλεψε αποτελεσματικά τα λειτουργικά έξοδα που σχετίζονται με ένα θεωρητικό αυτόνομο σύστημα που ενσωματώνει φωτοβολταϊκές, αιολικές και ντίζελ πηγές ενέργειας. Οι συγγραφείς Chedid και Rahman (1997) κατέληξαν στη διαπίστωση ότι η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ντίζελ θα απέφερε αξιοσημείωτη μείωση των λειτουργικών δαπανών της μονάδας. Ο Nehrir και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο Matlab για να εξετάσουν διεξοδικά την αποτελεσματικότητα ενός συστήματος αιολικής ενέργειας/PV και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση ενός ηλεκτρικού θερμαντήρα ζεστού νερού ως φορτίο απόρριψης κατέστησε το σύστημα που χρησιμοποιεί μόνο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οικονομικά πιο βιώσιμο (Nehriretal., 2000). Ο Ashok χρησιμοποίησε μια μεθοδολογία Quasi-Newtonian προκειμένου να εξακριβώσει το βέλτιστο σύστημα που θα απέδιδε την πιο αποδοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για ένα αγροτικό χωριό που βρίσκεται στην Ινδία. Σύμφωνα με τον Ashok (2007), διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή ενός συστήματος φωτοβολταϊκών/αιολικής ενέργειας/ντίζελ/μικροϋδροκίνησης θα εξασφάλιζε αποτελεσματικά την παροχή

ενέργειας όλο το εικοσιτετράωρο, διατηρώντας παράλληλα ένα σχετικά χαμηλό κόστος 0,14 δολαρίων ΗΠΑ ανά κιλοβατώρα. Στη μελέτη τους, οι Nfah και Ngundam (2009) διεξήγαγαν μια εξέταση των συστημάτων picohydro/biogas/PV με σκοπό να αξιολογήσουν την καταλληλότητά τους για εφαρμογή σε αγροτικές περιοχές του Καμερούν. Μέσω της ανάλυσής τους, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση του βιοαερίου στα υβριδικά συστήματα θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρομοίως, οι Ruther και συν. ανέλαβαν ένα έργο στην αγροτική Βραζιλία, όπου μετέτρεψαν με επιτυχία ένα μίνι-δίκτυο που λειτουργούσε μόνο με ντίζελ σε υβριδικό σύστημα. Στη συνέχεια, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν δεδομένα κατανάλωσης ντίζελ για να αποδείξουν ότι τα συστήματα φωτοβολταϊκών/ντίζελ χωρίς αποθήκευση μπαταρίας διαθέτουν την ικανότητα να περιορίσουν την κατανάλωση καυσίμου ντίζελ στο πλαίσιο των εγκαταστάσεων της Βόρειας Βραζιλίας. Οι Ruther και συν. (2003) εξέθεσαν τον αποκλεισμό των συστοιχιών μπαταριών στα υβριδικά συστήματα λόγω των επιζήμιων επιπτώσεων των απωλειών των μπαταριών στην κατανάλωση καυσίμου ντίζελ. Οι Phuangpornpitak και Kumar (2007) διεξήγαγαν έρευνα σχετικά με τις οικονομικές επιπτώσεις, τόσο τις θετικές όσο και τις αρνητικές, που συνδέονται με την εφαρμογή δέκα υβριδικών συστημάτων ηλιακής/αιολικής ενέργειας/ντίζελ στην Ταϊλάνδη κατά την περίοδο από το 1990 έως το 2004. Το μοναδικό έγγραφο που ανακαλύφθηκε περιέγραψε τις χρηματικές επιπτώσεις των απτών συστημάτων και εξέθεσε περαιτέρω την άποψη ότι ορισμένα συστήματα ξεπέρασαν το βασικό σύστημα μόνο με ντίζελ από άποψη κόστους, που οφείλεται κυρίως στον υπερβολικό σχεδιασμό. Οι Nayat και συν. (2000) κατασκεύασαν, εγκατέστησαν και αξιολόγησαν ένα σύστημα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS) με φωτοβολταϊκά (PV) / ντίζελ / μπαταρία / δίκτυο σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες στην Ινδία. Οι ερευνητές κατέγραψαν δεδομένα αξίας περίπου 24 ωρών που αφορούσαν την απόδοση του συστήματος. Αυτό περιελάμβανε διάφορα διαγράμματα που απεικόνιζαν την τάση της συστοιχίας μπαταριών, την έξοδο ισχύος του μετατροπέα, την τάση του δικτύου κοινής ωφέλειας και τη συχνότητα του συστήματος. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι στην έκθεση δεν περιλαμβάνονταν λεπτομέρειες σχετικά με το κόστος του συστήματος.

5.1.1. Οικονομικά των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σταθερές δαπάνες περιλαμβάνουν τις επαναλαμβανόμενες δαπάνες που πραγματοποιούνται σε ετήσια βάση, και συγκεκριμένα τους τόκους και τις αποσβέσεις. Τα επιτόκια εξαρτώνται από τις επικρατούσες οικονομικές συνθήκες κατά την περίοδο εφαρμογής. Ο καθορισμός των συντελεστών απόσβεσης εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες: την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του εν λόγω εξοπλισμού και τη συγκεκριμένη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόσβεσης. Η μονάδα παραγωγής ενέργειας και τα συστατικά της στοιχεία θα έχουν πεπερασμένη διάρκεια χρησιμότητας. Κατά τη διάρκεια μιας παρατεταμένης περιόδου χρήσης, ο εξοπλισμός παρουσιάζει μείωση της λειτουργικής του αποτελεσματικότητας ή παλαιώνεται, καθιστώντας αναγκαία την προμήθεια αντικαταστάτη. Προκειμένου να διευκολυνθεί η έγκαιρη εκτέλεση αυτής της προσπάθειας, διατίθεται σε ετήσια βάση ένα ορισμένο ποσό χρηματικών πόρων, το οποίο συνήθως αναφέρεται ως ταμείο απόσβεσης ή ταμείο βύθισης (Lenzen, 1999).

5.1.2. Έννοια της παρούσας αξίας

Η έννοια της παρούσας αξίας είναι η αξία ενός χρηματικού ποσού την παρούσα στιγμή που, με ανατοκισμό, θα έχει μια συγκεκριμένη αξία σε ορισμένο χρόνο στο μέλλον. Η καταβολή ανατοκισμού με επιτόκιο i θα αυξήσει την αξία ενός κεφαλαίου κατά $(1+i)^N$ μέσα σε N χρόνια. Η παρούσα αξία (PW) μιας πληρωμής C που θα πραγματοποιηθεί μετά από N έτη είναι επομένως

$$PW = \frac{C}{(1+i)^N}$$

Σε πολλές περιπτώσεις, απαιτούνται ίσα ποσά ετήσιων δαπανών. Τότε η παρούσα αξία μιας ομοιόμορφης ετήσιας σειράς πληρωμών P μετά από N έτη υπολογίζεται από τις εξισώσεις

$$\begin{aligned} PW &= P \frac{(1+i)^N - 1}{i} \times \frac{1}{(1+i)^N} \\ &= \frac{P}{i(1+i)^N} [(1+i)^N - 1] \end{aligned}$$

5.1.3. Φορτίο συστήματος

Ο λόγος ύπαρξης των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έγκειται στην ικανότητά τους να καλύπτουν σημαντικά φορτία. Κατά συνέπεια, η ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αρχίζει με τη σχολαστική εξέταση του φορτίου ή των φορτίων που καθιστούν αναγκαία την παροχή του συστήματος. Τα δεδομένα ωριαίου μέσου φορτίου που αφορούν τον οικιακό τομέα στην Enugu προμηθεύτηκαν από την αξιολογή Power Holding Company of Nigeria (PHCN) (Duffie and Bechaman, 1991).

Πίνακας1 Daily average electricity demand for month of March (2010)

Πίνακας2 Meteorological data and global solar radiation for Enugu (Lat: 6026'24"N and Long: 7030'36"E)

Hour	Load(kWh)
00:00-01:00	0.68
01:00-02:00	0.58
02:00-03:00	0.59
03:00-04:00	0.65
04:00-05:00	0.75
05:00-06:00	0.79
06:00-07:00	1.08
07:00-08:00	0.84
08:00-09:00	0.75
09:00-10:00	0.82
10:00-11:00	0.80
11:00-12:00	0.94
12:00-13:00	0.95
13:00-14:00	0.98
14:00-15:00	1.01
15:00-16:00	1.09
16:00-17:00	1.05
17:00-18:00	1.15
18:00-19:00	1.31
19:00-20:00	1.50
20:00-21:00	1.48
21:00-22:00	1.44
22:00-23:00	0.98
23:00-24:00	0.72
Total	22.93

5.1.4. Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Μια φωτοβολταϊκή (PV) συστοιχία είναι μια συσκευή η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος σε άμεση αναλογία με την παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω της. Η παραγωγή ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, καθώς και από τη

θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Η ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή προσομοιώνεται με τη χρήση της έκφρασης (DuffieandBechaman, 1991).

$$P_{PV} = P_{RF_{PV}} \left(\frac{G}{G_{STC}} \right)$$

Όπου: P_R πρόκειται για την ονομαστική ισχύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, δηλαδή την ισχύ εξόδου της υπό τυπικές συνθήκες δοκιμής; f_{PV} είναι ο PV παράγοντας απορρόφησης (%); G είναι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη φωτοβολταϊκή συστοιχία κατά το τρέχον χρονικό βήμα (kW/m^2); G_{STC} είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο STC ($1\text{kW}/\text{m}^2$).

5.1.5. Διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Ο προσδιορισμός των κατάλληλων διαστάσεων για μια συστοιχία σε ένα υβριδικό σύστημα συνήθως συνεπάγεται μια επαναληπτική διαδικασία. Η αρχική διαδικασία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των κατάλληλων διαστάσεων για τη συστοιχία σε ένα σενάριο όπου δεν υπάρχει γεννήτρια. Στη συνέχεια, εκτελείται συστηματική μείωση του αριθμού των μονάδων εντός της συστοιχίας, ταυτόχρονα με τον υπολογισμό της αναλογικής συμβολής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στην κάλυψη των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων. Η ημερήσια ενεργειακή απαίτηση, που συμβολίζεται ως E'_{PV} , σε αμπέρ-ώρες (Ah) που προέρχεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι:

$$E'_{PV} = \frac{E_{PV}}{V_s}$$

Πού: E_{PV} είναι η απαιτούμενη ενέργεια (kWh) και V_s είναι η τάση του συστήματος στην πλευρά DC (V). Έχοντας υπόψη τις απώλειες του μετατροπέα και

τα μετεωρολογικά δεδομένα, το απαιτούμενο ρεύμα σχεδιασμού I_d σε Αμπέρ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι

$$I_d = \frac{E'_{PV}}{psh \cdot \eta_{conv} \cdot J_{PV}}$$

Όπου: psh είναι οι ώρες αιχμής-ηλιοφάνειας του εξεταζόμενου μήνα για το σχεδιασμό (ώρες), η_{conv} είναι η απόδοση του μετατροπέα. Τότε ο αριθμός των μονάδων m_p που συνδέονται παράλληλα είναι:

$$m_p = \frac{I_d}{I_m}$$

Όπου: I_m (A) είναι το PV ρεύμα μονάδας στο STC. Ομοίως, ο αριθμός των μονάδων m_s που συνδέονται σε σειρά είναι:

$$m_s = \frac{V_s}{V_m}$$

Όπου: V_m είναι η τάση της μονάδας (V). Ο συνολικός αριθμός των μονάδων στη συστοιχία είναι επομένως, αριθμός των παράλληλων μονάδων επί τον αριθμό των μονάδων σε σειρά, δηλ.

Συνολικός αριθμός ενοτήτων = $m_p \times m_s$

Για να δημιουργηθεί ένα υβριδικό σύστημα, είναι επιτακτική ανάγκη να εξαλειφθούν επιλεκτικά ορισμένες μονάδες από τη συστοιχία και στη συνέχεια να αντισταθμιστούν οι ελλείψεις τους μέσω της χρήσης των υπόλοιπων μονάδων εντός της συστοιχίας, εισάγοντας έτσι μια γεννήτρια ντίζελ ως συμπληρωματικό στοιχείο. Η προαναφερθείσα διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά σε διάφορα μεγέθη συστοιχιών προκειμένου να διαπιστωθεί το βέλτιστο υβριδικό σύστημα που μπορεί να καλύψει αποτελεσματικά το φορτίο, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος κύκλου ζωής (LCC) εντός του καθορισμένου χρονικού πλαισίου. Οι μπαταρίες αποθήκευσης θεωρούνται απαραίτητες σε όλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος που λειτουργούν ανεξάρτητα, εξυπηρετώντας τον διπλό σκοπό να λειτουργούν ως

ρυθμιστής ισχύος και να διευκολύνουν την αποθήκευση ενέργειας. Στο πλαίσιο του σχεδιασμού υβριδικών συστημάτων ντίζελ-φωτοβολταϊκών συστημάτων, η προσεκτική εξέταση της επιλογής των μπαταριών αποκτά ύψιστη σημασία. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό όχι μόνο της ποσότητας ενέργειας που μπορεί να παρέχει αλλά και του μέγιστου φορτίου που μπορεί να υποστηριχθεί αποτελεσματικά από το υποσύστημα μπαταρίας-μετατροπέα (DuffieandBechaman, 1991).

5.1.6. Οικονομική ανάλυση

Η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία για την οικονομική ανάλυση στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται στη χρήση του κόστους κύκλου ζωής (LCC). Το έργο που παρουσιάζει το βέλτιστο κόστος κύκλου ζωής (LCC) θα επιλεγεί για επιλογή. Η χρονική διάρκεια των εξεταζόμενων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εκτείνεται σε μια περίοδο 25 ετών. Η επιλογή του συγκεκριμένου στοιχείου βασίζεται στην ανώτερη μακροζωία του σε σχέση με άλλα συστατικά στοιχεία, καθώς το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαθέτει εντυπωσιακή λειτουργική διάρκεια ζωής 25 ετών. Το ετήσιο πραγματικό επιτόκιο μπορεί να συνδεθεί μαθηματικά με το ονομαστικό επιτόκιο μέσω της παρεχόμενης εξίσωσης:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f}$$

Όπου: i' είναι το ονομαστικό επιτόκιο- f είναι ο ετήσιος ρυθμός πληθωρισμού. Για τους λόγους της παρούσας μελέτης, το ετήσιο πραγματικό επιτόκιο θεωρείται ότι είναι 9% για όλες τις εξεταζόμενες δαπάνες.

5.1.7. Κόστος κύκλου ζωής

Υπολογίζεται το συνολικό LCC ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$LCC = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})}$$

Όπου: $C_{ann,tot}$ είναι το συνολικό ετήσιο κόστος (N/yr); CRF είναι ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου, R_{proj} είναι η διάρκεια ζωής του έργου (έτη). Κατάταξη όλων των συστημάτων σύμφωνα με το συνολικό LCC τους. Ο συντελεστής ανάκτησης δυναμικότητας είναι ένας λόγος που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας μιας ετήσιας προσόδου (μια σειρά από ίσες ετήσιες ταμειακές ροές). Η εξίσωση για τον συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου είναι:

$$CRF(i, R) = \frac{i(1+i)^R}{(1+i)^R - 1}$$

Όπου: R είναι ο αριθμός των εξεταζόμενων ετών.

5.1.8. Συνολικό ετήσιο κόστος

Το συνολικό ετήσιο κόστος αποτελεί το άθροισμα του ετήσιου κόστους κάθε στοιχείου του συστήματος.

$$\begin{aligned} C_{ann,tot} &= C_{ann,pv} + C_{ann,bat} + C_{ann,con} + C_{ann,dg} \\ C_{ann,comp} &= C_{acap} + C_{arep} + C_{ann,o\&m} + C_{ann,fuel} \end{aligned}$$

Όπου: C_{acap} είναι το ετήσιο κόστος κεφαλαίου; C_{arep} είναι το ετήσιο κόστος αντικατάστασης; $C_{ann,o\&m}$ είναι το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. $C_{ann,fuel}$ είναι το ετήσιο κόστος καυσίμων (κατά περίπτωση).

5.1.9. Ετήσιο κόστος κεφαλαίου (απόσβεση)

To calculate the annualized capital cost of each component, we use the following equation:

$$C_{acap} = C_{cap} \times CRF(i, R_{proj})$$

Όπου: C_{cap} είναι το αρχικό κόστος κεφαλαίου του στοιχείου.

5.1.10. Ετήσιο κόστος αντικατάστασης (Ταμείο Αποσβέσεων)

Το ετήσιο κόστος αντικατάστασης ενός στοιχείου του συστήματος προκύπτει από την εξίσωση:

$$C_{arep} = [C_{rep} \times f_{rep} \times SFF(i, R_{comp})] - [S \times SFF(i, R_{proj})]$$

f_{rep} είναι ένας παράγοντας που οφείλεται στο γεγονός ότι η διάρκεια ζωής του κατασκευαστικού στοιχείου μπορεί να είναι διαφορετική από τη διάρκεια ζωής του έργου και δίνεται από τη σχέση:

$$f_{rep} = \begin{cases} CRF(i, R_{proj}) / CRF(i, R_{rep}), & R_{rep} > 0 \\ 0, & R_{rep} = 0 \end{cases}$$

R_{rep} είναι η διάρκεια του κόστους αντικατάστασης για όλη τη διάρκεια ζωής του έργου και δίνεται από:

$$R_{rep} = R_{comp} \cdot INT\left(\frac{R_{proj}}{R_{comp}}\right)$$

Η συνάρτηση που συμβολίζεται ως INT είναι μια μαθηματική πράξη που δίνει την ακέραια συνιστώσα μιας δεδομένης πραγματικής τιμής. Υποστηρίζεται ότι η υπολειμματική αξία του συστατικού κατά την κορύφωση της διάρκειας ζωής του έργου συσχετίζεται άμεσα με τη διάρκεια που απομένει. Ως εκ τούτου, η αξία διάσωσης, που συμβολίζεται ως S, μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$S = C_{rep} \times \frac{R_{rem}}{R_{comp}}$$

Όπου: R_{rem} , η εναπομένουσα διάρκεια ζωής του κατασκευαστικού στοιχείου στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου και δίνεται από τη σχέση

$$R_{rem} = R_{comp} - (R_{proj} - R_{rep})$$

5.1.11. Κόστος ενέργειας (COE)

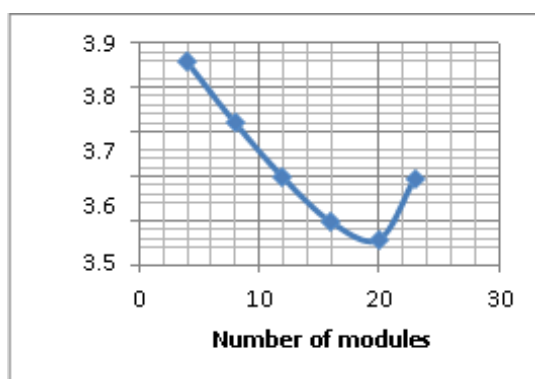
Η εξίσωση για το COE δίνεται ως εξής:

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim}}$$

Όπου: E_{prim} είναι το πρωτογενές φορτίο που εξυπηρετείται.

Το κόστος κύκλου ζωής (LCC) υπολογίστηκε για συστήματα που περιλαμβάνουν έξι διαφορετικά μεγέθη συστοιχιών, συγκεκριμένα 4, 8, 12, 16, 20 και 23. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονταν από τη χρήση 23 μονάδων, που λειτουργούσαν ως αυτόνομο σύστημα παραγωγής ενέργειας που τροφοδοτούνταν από φωτοβολταϊκά (PV).

Πίνακας3 Hybrid system LCC vs. Number of modules



Μετά από προσεκτική ανάλυση των στοιχείων κόστους κύκλου ζωής, διαπιστώθηκε ότι το σύστημα που αποτελείται από 20 μονάδες επιλέχθηκε ως η καταλληλότερη επιλογή. Η φωτοβολταϊκή (PV) συστοιχία του συγκεκριμένου συστήματος είναι υπεύθυνη για την παροχή του 89,2% των συνολικών ενεργειακών αναγκών κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η παρατήρηση αυτή υποστηρίζεται από τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3β, τα οποία δείχνουν σαφώς ότι η φωτοβολταϊκή συστοιχία τοποθετείται ακριβώς στο σημείο όπου το κόστος του συστήματος αρχίζει να αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τη διαθεσιμότητα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου συστήματος, αναμένεται ότι η φωτοβολταϊκή συστοιχία θα καλύπτει κυρίως τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια που εκτείνεται από τον Φεβρουάριο έως τον Οκτώβριο. Κατά τη διάρκεια της περιόδου από τον Νοέμβριο έως τον Ιανουάριο, η γεννήτρια προβλέπεται να αποδίδει από 10,8 έως 32,2 κιλοβατώρες ανά μήνα. Αυτό συνοδεύεται από ετήσια κατανάλωση καυσίμου 264,5 λίτρων, με εκτιμώμενη διάρκεια λειτουργίας περίπου 295 ώρες. Η λειτουργικότητα της γεννήτριας εξαρτάται από την εκφόρτιση των μπαταριών σε κατάσταση ισοδύναμη με το 20% της συνολικής τους χωρητικότητας. Στη συνέχεια, η γεννήτρια προχωρά στην αναπλήρωση των μπαταριών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της (KarnavasandPapadopoulos, 1999).

Πίνακας4 Life cycle cost result of the optimal hybrid system (20 modules)

Component	Capital (N)	Replacement (N)	O&M (N)	Fuel (N)	Salvage (N)	Total (N)
PV	1,900,000	0	34380	0	0	1,934,380
Diesel Gen	90,000	12,616	28,776	246,817	9,430	387,639
Battery Bank	456,000	407,385	39,292	0	43,967	946,644
Converter	110,000	66,092	127,691	0	6,378	310,161
System	2,556,000	486,093	230,139	24,817	59,775	3,459,274

Υπολογίστηκαν οι ετήσιες δαπάνες που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας για την υβριδική διαμόρφωση και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 4. Το υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούμενο από 20 μονάδες, παρουσιάζει το χαμηλότερο ετήσιο ισοσταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (COE), το οποίο ανέρχεται σε N40,23 ανά κιλοβατώρα (kWh). Σύμφωνα με τους Karnavas και Papadopoulos (1999), το κόστος ενέργειας για το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα που αποτελείται από 23 μονάδες είναι N41,55 ανά kWh.

Τα υπολογιστικά ευρήματα που προκύπτουν από την έρευνά τους αποδεικνύουν απερίφραστα ότι η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστοιχιών και ντιζελογεννητριών αποδίδει ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας που είναι τόσο οικονομικά επωφελές όσο και κατάλληλο για οικιακή κατανάλωση. Η εφαρμογή αυτού του υβριδικού συστήματος μετριάζει αποτελεσματικά τη σημαντική αρχική επένδυση που συνήθως συνδέεται με τα φωτοβολταϊκά πάνελ, ενώ ταυτόχρονα ανακουφίζει τα υπέρογκα έξοδα που προκύπτουν από την κατανάλωση καυσίμων, τις λειτουργικές απαιτήσεις και τις υποχρεώσεις συντήρησης που συνδέονται με τις γεννήτριες ντίζελ. Η χρήση μιας γεννήτριας ντίζελ οδηγεί σε μείωση της ποσότητας των μονάδων που απαιτούνται για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, με ταυτόχρονη σημαντική μείωση της διάρκειας λειτουργίας της γεννήτριας ντίζελ λόγω της σημαντικής συνεισφοράς στην παραγωγή ενέργειας από τη PV συστοιχία. Με βάση την ανάλυση βελτιστοποίησης που διεξήχθη, είναι προφανές ότι το σύστημα που αποτελείται από 20 μονάδες καλύπτει αποτελεσματικά τις απαιτήσεις ισχύος με την πλέον οικονομική δαπάνη. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία καλύπτει το 89,2% της συνολικής ζήτησης ισχύος, ενώ η γεννήτρια ντίζελ συμβάλλει κατά 10,8% στην κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια (Adaramola, Paul, & Oyewola, 2014).

Με βάση την οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, είναι προφανές ότι το υβριδικό σύστημα αναδεικνύεται ως η πιο ευνοϊκή επιλογή μεταξύ των τριών εξεταζόμενων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζοντας το χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής και το χαμηλότερο κόστος ενέργειας. Κατά τη διενέργεια συγκριτικής ανάλυσης μεταξύ της καθαρής παρούσας αξίας (NPV) του υβριδικού συστήματος και του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, με το αυτόνομο σύστημα ντίζελ να χρησιμεύει ως περίπτωση αναφοράς, καθίσταται εμφανές ότι το υβριδικό σύστημα παρουσιάζει ανώτερη NPV ύψους N3.638.918 σε αντίθεση με την NPV ύψους N3.428.747 που παρατηρείται για το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Το υβριδικό σύστημα παρουσιάζει εσωτερικό συντελεστή απόδοσης 26,3%, ενώ το αυτόνομο σύστημα, όταν αξιολογείται με όρους παρούσας αξίας, παρουσιάζει εσωτερικό συντελεστή απόδοσης 24,6%. Εκτός από τα οικονομικά οφέλη, αξίζει να σημειωθεί ότι το υβριδικό σύστημα είναι φιλικό προς το περιβάλλον λόγω της ικανότητάς του να περιορίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρύπων που συνήθως συνδέονται με το καύσιμο ντίζελ. Είναι επιτακτική ανάγκη να διευκρινιστεί ότι η εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος έχει σημαντική σημασία όσον αφορά την παράταση της διάρκειας ζωής των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Adaramola, PaulandOyewola, 2014).

5.2. Υβριδικά συστήματα ισχύος ηλιακής-αιολικής ενέργειας στις βιομηχανίες

Η αξιοποίηση της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Μια συγκριτική ανάλυση που διεξήγαγε ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) σχετικά με την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αποκαλύπτει ότι μέχρι το 2050 οι εγκαταστάσεις ηλιακών συστοιχιών αναμένεται να καλύψουν περίπου το 45% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Η ολοένα αυξανόμενη σημασία της ηλιοθερμίας στις βιομηχανικές εφαρμογές έχει επισημανθεί δεόντως. Η ηλιοθερμία αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την επεξεργασία χημικών

ουσιών, ακόμη και την παροχή θέρμανσης χώρων. Αυτή η ευπροσάρμοστη ουσία βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, των τροφίμων, των μη μεταλλικών προϊόντων, της κλωστοϋφαντουργίας, των κτιρίων, των χημικών προϊόντων και των επιχειρήσεων. Αντίθετα, η ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια βρίσκει εκτεταμένη εφαρμογή σε διάφορους τομείς, όπως οι τηλεπικοινωνίες, η γεωργία, η αφαλάτωση νερού και η οικοδομική βιομηχανία, με σκοπό την τροφοδοσία ενός ευρέος φάσματος συσκευών, όπως φώτα, αντλίες, κινητήρες, ανεμιστήρες, ψυγεία και θερμοσίφωνες. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας κατέχει σημαντική σημασία σε πλήθος εφαρμογών, καθώς προσφέρει βιώσιμες ενεργειακές λύσεις μέσω της ρύθμισης της διανομής ενέργειας, της ενίσχυσης της ενεργειακής αξιοπιστίας, της προώθησης της ενεργειακής βιωσιμότητας, της μείωσης των απωλειών μετατροπής και της συνακόλουθης βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος.

Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στη διερεύνηση του κόστους κύκλου ζωής (LCC) που σχετίζεται με τα υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ηλιακής και αιολικής ενέργειας στο πλαίσιο βιομηχανικών εφαρμογών. Η ανάλυση LCC περιλαμβάνει την αξιολόγηση του κόστους κεφαλαίου, των δαπανών συντήρησης και των λειτουργικών δαπανών που προκύπτουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος (Mekhilef, Saidur and Safari, 2011).

5.3. Αξιολόγηση του κύκλου ζωής των μπαταριών ιόντων λιθίου για υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα plug-in

Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας έρευνας ήταν να εξεταστεί η δυνατότητα αξιοποίησης της αξιολόγησης του κύκλου ζωής για τη βελτίωση του σχεδιασμού μπαταριών ιόντων λιθίου ειδικά προσαρμοσμένων για υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEV). Η παρούσα μελέτη διεξήγαγε αξιολόγηση κύκλου ζωής σε δύο μπαταρίες ιόντων λιθίου που έχουν κοινή σύνθεση φωσφορικού σιδήρου λιθίου, αλλά διαφέρουν ως προς τους διαλύτες που χρησιμοποιούνται κατά τη

διαδικασία κατασκευής. Τα γενικότερα ευρήματα περιορίζονται σε αποτελέσματα που επιδεικνύουν ανθεκτικότητα απέναντι σε διακυμάνσεις κρίσιμων δεδομένων. Η μελέτη που διεξήχθη κατέδειξε την περιβαλλοντική υπεροχή της χρήσης νερού ως διαλύτη, σε αντίθεση με τη Ν-μεθυλ-2-πυρρολιδόνη (NMP), εντός του αιωρήματος που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία χύτευσης τόσο των εξαρτημάτων της καθόδου όσο και της ανόδου των μπαταριών ιόντων λιθίου. Τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος στην τεχνολογία των μπαταριών, ιδίως όσον αφορά τη διάρκεια ζωής των κύκλων, έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη φάση της παραγωγής. Η μείωση αυτή έφερε τις επιπτώσεις αυτές σχεδόν στο ίδιο επίπεδο με εκείνες που παρατηρούνται κατά τη φάση της χρήσης (Gaines and Cuenca, 2000). Κατά τη φάση χρήσης, έχει παρατηρηθεί ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την εσωτερική απόδοση της μπαταρίας των plug-in υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων είναι περίπου δύο έως έξι φορές μεγαλύτερες από τις συνέπειες που προκύπτουν από τις απώλειες που αποδίδονται στο βάρος της μπαταρίας. Η εκτίμηση αυτή γίνεται με την παραδοχή ότι η εσωτερική μπαταρία λειτουργεί με αξιόπαινο ποσοστό απόδοσης 90%. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί η σημασία της απόδοσης της εσωτερικής μπαταρίας, η οποία έχει ανάλογη σημασία με το βάρος της μπαταρίας, όπως τονίζει ο Zackrisson (2009).

Ανεπαρκή ή ελλιπή δεδομένα μπορούν να παρατηρηθούν σε διάφορους τομείς όπου οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν σημαντική σημασία. Αυτοί οι τομείς περιλαμβάνουν την παραγωγή συνδετικών υλικών, την παραγωγή αλάτων λιθίου, την κατασκευή και συναρμολόγηση κυψελών, τη συσχέτιση μεταξύ του βάρους του οχήματος και της κατανάλωσης ενέργειας του οχήματος, καθώς και την έλλειψη πληροφοριών σχετικά με την εσωτερική απόδοση της μπαταρίας και την ανακύκλωση των μπαταριών ιόντων λιθίου που βασίζονται στο φωσφορικό λίθιο-σιδήρου. Η παρούσα μελέτη εμβαθύνει στην εξέταση του κόστους κύκλου ζωής (LCC) που σχετίζεται με τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα plug-in (PHEV). Η μελέτη έχει τη δυνατότητα να επικυρώσει την περιβαλλοντική υπεροχή του νερού ως διαλύτη σε σύγκριση με το NMP όσον αφορά τον πολτό που χρησιμοποιείται για τη χύτευση των καθόδων και των ανόδων των μπαταριών ιόντων λιθίου. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι πιθανές επιπτώσεις που προκύπτουν από τις εκπομπές διαλυτών στο

χώρο εργασίας δεν υποβλήθηκαν σε μοντελοποίηση στη συγκεκριμένη μελέτη. Η Ν-μεθυλοπυρρολιδόνη (NMP) έχει αναγνωριστεί ως ουσία με αναπαραγωγικές τοξικολογικές ιδιότητες. Παρ' όλα αυτά, η ισοδυναμία των χαρακτηριστικών μεταξύ του LiFePO₄ που παράγεται μέσω της χρήσης νερού και εκείνων που κατασκευάζονται μέσω της εφαρμογής της NMP σε εμπορικές εφαρμογές παραμένει ανεπιβεβαίωτη. Η ολοκληρωμένη ανάλυση περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες, δηλαδή το αρχικό κόστος απόκτησης του οχήματος, τα τρέχοντα έξοδα συντήρησης, την κατανάλωση καυσίμου, καθώς και τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία αξιολογούνται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του οχήματος (Zackrisson, AvellánandOrlenius, 2010).

5.4. Μικροδίκτυα συνδεδεμένα στο δίκτυο

Η έρευνα που διεξήχθη από τους Hatziargyriou και συν. εμβαθύνει στην εξέταση της ανάλυσης του κόστους κύκλου ζωής (LCC) που αφορά τα μικροδίκτυα που συνδέονται στο δίκτυο. Αυτά τα μικροδίκτυα, που χαρακτηρίζονται από τη μικρή κλίμακα και τον τοπικό τους χαρακτήρα, διαθέτουν τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα ή σε συνδυασμό με το πρωτεύον δίκτυο. Οι μελετητές στρέφουν την προσοχή τους σε μια πληθώρα κομβικών στοιχείων, συμπεριλαμβανομένης της κατανομής παραγωγής, της αποθήκευσης ενέργειας και των συστημάτων ελέγχου, με στόχο την αξιολόγηση της οικονομικής τους σκοπιμότητας και την κατανόηση της σημασίας τους για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της βιωσιμότητας του δικτύου (Hatziargyriouetal., 2007).

Ένα μικροδίκτυο (MG) είναι μια μικροσκοπική οντότητα στη σφαίρα των ηλεκτρικών δικτύων, η οποία περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πηγών κατανομής παραγωγής (DG), συσκευές αποθήκευσης και ένα σύνολο φορτίων που κατηγοριοποιούνται σε διάφορες κατηγορίες. Το MG, συντομογραφία του Microgrid, είναι μια εξαιρετικά αξιόπιστη και αδιαπέραστη πηγή ενέργειας που καλύπτει τις βασικές ενεργειακές ανάγκες των κοινοτήτων, λειτουργώντας απρόσκοπτα τόσο σε σενάρια εντός όσο και εκτός δικτύου. Το παρόν ερευνητικό εγχείρημα περιλαμβάνει

την ανάπτυξη και την ανάλυση μιας σχολαστικά σχεδιασμένης στρατηγικής ελέγχου διαχείρισης ισχύος για ένα αντιπροσωπευτικό δίκτυο μικροδικτύου (MG) χαμηλής τάσης (LV). Η ενσωμάτωση της ηλιακής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας (PV) και μιας εγκατάστασης αποθήκευσης εξετάζεται διεξοδικά στο περιβάλλον του λογισμικού Matlab-Simu-link. Η διερεύνηση περιλαμβάνει διάφορους τρόπους λειτουργίας του MG, συμπεριλαμβανομένων του εντός δικτύου, του εκτός δικτύου και της μετάβασης από το εντός δικτύου στο εκτός δικτύου. Οι μετατροπείς ισχύος ηλιακών φωτοβολταϊκών και μπαταριών αναγνωρίζονται συνήθως ως μετατροπείς πηγής τάσης (VSIs) που υποστηρίζουν το δίκτυο και σχηματίζουν δίκτυο (GsGfm) λόγω της χρήσης τροποποιημένων στρατηγικών ελέγχου droop και εικονικής σύνθετης αντίστασης εξόδου. Η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου διευκολύνει την εφαρμογή συντονισμένων λειτουργιών ελέγχου μεταξύ φωτοβολταϊκών μονάδων και συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών. Εξασφαλίζει τον ισομερή καταμερισμό ισχύος μεταξύ των πηγών κατανεμημένης παραγωγής (DG) και επιτρέπει την απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ των λειτουργιών μικροδικτύου (MG), ενώ ρυθμίζει τα επίπεδα τάσης και συχνότητας εντός του δικτύου MG (Hatziaargyriouetal., 2007).

5.5. Τεχνικοοικονομική ανάλυση υβριδικού συστήματος ηλιακής ενέργειας και βιομάζας αγροτικών περιοχών

Η αξιοποίηση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτός δικτύου έχει αναδειχθεί ως μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των αγροτικών περιοχών, αν και σε περιορισμένο βαθμό, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι συμβατικοί πόροι. Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να παρουσιαστεί ένας οικονομικά αποδοτικός και αποτελεσματικός σχεδιασμός για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση μιας υβριδικής πηγής ενέργειας που αποτελείται από τεχνολογίες φωτοβολταϊκών και βιομάζας. Οι επιδιωκόμενοι δικαιούχοι αυτού του προτεινόμενου σχεδιασμού είναι ένα γεωργικό αγρόκτημα και μια οικιστική κοινότητα που βρίσκονται σε ένα μικρό χωριό που βρίσκεται στην περιοχή Layyah της επαρχίας

Punjab στο Πακιστάν. Τα δεδομένα που αφορούν το ηλεκτρικό φορτίο συλλέχθηκαν όσον αφορά τόσο τις ανάγκες άρδευσης όσο και τις οικιακές ανάγκες. Το υβριδικό μοντέλο βελτιστοποίησης για ηλεκτρικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (HOMER) χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση και εκτέλεση μιας τεχνικοοικονομικής αξιολόγησης με στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων φορτίου μέσω της χρήσης μιας υβριδικής διαμόρφωσης φωτοβολταϊκών/βιομάζας. Η αξιοποίηση των δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και η αξιολόγηση του δυναμικού βιομάζας στη γεωργική γη πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του λογισμικού HOMER για τους σκοπούς της διεξαγωγής της ανάλυσης. Η λύση που προέκυψε από την ανάλυση HOMER έδωσε το συνολικό καθαρό παρόν κόστος (NPC) και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (COE). Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτά υποβλήθηκαν σε περαιτέρω βελτίωση μέσω της εκτέλεσης ανάλυσης ευαισθησίας. Η ανάλυση ευαισθησίας ενσωμάτωσε διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένου του δυναμικού βιομάζας, της τιμής βιομάζας, της ηλιακής ακτινοβολίας και των διακυμάνσεων του φορτίου. Η ανάλυση αυτή παρουσιάζει μια συγκριτική αξιολόγηση των επιδόσεων του συστήματος και αποδεικνύει την τεchnοοικονομική σκοπιμότητά του, λαμβάνοντας υπόψη το καθαρό παρόν κόστος και το κόστος ενέργειας. Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην αξιολόγηση του κόστους κύκλου ζωής (LCC) που σχετίζεται με τα υβριδικά συστήματα θέρμανσης ηλιακής ενέργειας-βιομάζας που χρησιμοποιούνται με σκοπό τον αγροτικό εξηλεκτρισμό. Η αξιολόγηση αυτή λαμβάνει υπόψη τόσο τις κεφαλαιουχικές όσο και τις λειτουργικές δαπάνες που προκύπτουν, ενώ εξετάζει επίσης τα οικονομικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα συστήματα αυτά στις αγροτικές κοινότητες (Shahzadetal., 2017).

5.6. Τεχνοοικονομική ανάλυση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος: Δονούσα, Ελλάδα

Τα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (HRES) παρουσιάζονται ως μια ελκυστική και βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως τα

νησιά και οι κοινότητες που αντιμετωπίζουν εμπόδια στην επέκταση της συμβατικής υποδομής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα συγχωνεύουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μαζί με τις συμβατικές μονάδες και την αποθήκευση μπαταριών, διευκολύνοντας έτσι την παροχή ενέργειας τόσο σε συστήματα εκτός δικτύου όσο και σε συστήματα εντός δικτύου. Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της ερευνητικής προσπάθειας είναι η διεξοδική διερεύνηση της τεχνικοοικονομικής σκοπιμότητας και βιωσιμότητας της εφαρμογής ενός υβριδικού συστήματος στο πλαίσιο του νησιού Δονούσα, που βρίσκεται στην Ελλάδα. Η εξέταση αυτή θα διεξαχθεί σε διάφορα σενάρια, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη ανάλυση των πιθανών αποτελεσμάτων και επιπτώσεων του συστήματος. Πραγματοποιήθηκε τεχνικοοικονομική ανάλυση για την αξιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε τρία διαφορετικά σενάρια, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διαφορετικά ποσοστά υιοθέτησης (20%, 50% και 100%) και διαφορετικές διαμορφώσεις του συστήματος. Με τη χρήση του λογισμικού HOMERPro, επιλέχθηκε η βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος από το εύρος των εφικτών διαμορφώσεων σε κάθε σενάριο. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στα κριτήρια της επίτευξης του χαμηλότερου καθαρού παρόντος κόστους (NPC), της ελαχιστοποίησης του ποσοστού της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας και της επίτευξης του χαμηλότερου ισοσταθμισμένου κόστους ενέργειας (LCoE). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση διαθέτουν τη δυνατότητα να παρέχουν επιχειρησιακές κατευθυντήριες γραμμές για την εφαρμογή ενός πρακτικού υβριδικού συστήματος στο νησί της Δονούσας. Τα ευρήματα της προσομοίωσης επικυρώνουν τη χρήση ενός υβριδικού συστήματος που παρουσιάζει πλήρη απουσία περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας, ικανοποιητικό Καθαρό Παρόντος Κόστος (NPC) και Επίπεδο Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας (LCoE), καθώς και αξιόπαινο επίπεδο ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως καταδεικνύουν οι Katsivelakis και συν (2021).

Υλοποιήθηκαν τρία πρωταρχικά σενάρια, το καθένα με διαφορετικά ποσοστά υιοθέτησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (20%, 50% και 100%). Σε κάθε σενάριο, οι συμβατικές μονάδες του υφιστάμενου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υπέστησαν σταδιακή μείωση. Πραγματοποιήθηκε μια σειρά τεχνικοοικονομικών

αναλύσεων με τη χρήση του λογισμικού HOMER. Η επιλογή του καταλληλότερου υβριδικού συστήματος για κάθε δεδομένο σενάριο βασίστηκε στα κριτήρια του ελάχιστου ποσοστού πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και του βελτιστοποιημένου καθαρού παρόντος κόστους (NPC) και του ισοσταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (LCoE), όπως περιγράφεται από τους Ma, Yang και Lu στη μελέτη τους το 2014. Η πρωταρχική αρχή που διέπει την έρευνα περιστράφηκε γύρω από την αέναη εκπλήρωση των απαιτήσεων φορτίου, σε συνδυασμό με τη διερεύνηση ενός υβριδικού συστήματος που θα προσέφερε μια βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση για μια περίοδο δύο δεκαετιών. Το βέλτιστο σενάριο του συστήματος συνεπαγόταν την εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος, όπως προτείνεται στο Σενάριο 2, όπου υπήρχε πλήρης απουσία πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα το καθαρό παρόν κόστος (NPC) να ανέρχεται σε 4.031.102,03 € και το ισοσταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (LCoE) να ανέρχεται σε 0,2401 €. Άλλες μελέτες έδωσαν επίσης συγκρίσιμα αποτελέσματα σε ποσοστά (Halabietal., 2017).

6. Συνδυασμός ανάλυσης κύκλου ζωής και ανάλυση κόστους ζωής σε υβριδικά συστήματα.

6.1. Εκτίμηση κύκλου ζωής και ανάλυση κόστους κύκλου ζωής ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η επιδίωξη της βιωσιμότητας απαιτεί την επιμελή αναζήτηση συγκεκριμένων δεικτών και τον σχολαστικό έλεγχο των μεταβλητών που ασκούν επιρροή στην κατάσταση των οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών θεμάτων. Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να συμβάλει πολύτιμα στην προώθηση ενός ολοκληρωμένου εργαλείου που να είναι τόσο πρακτικό όσο και αξιόπιστο για τη διενέργεια συστηματικής αξιολόγησης της αειφορίας. Το εργαλείο αυτό βασίζεται στην ενσωμάτωση της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (LCA) και της Διαδικασίας Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), με απώτερο στόχο να βοηθήσει τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στην αντιμετώπιση περίπλοκων προβλημάτων λήψης αποφάσεων στο πεδίο της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Τα ευρήματα εφαρμόζονται σε ένα πρωτοποριακό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα, το οποίο έχει προταθεί ως κατάλληλη τεχνολογία για την αποθήκευση ενέργειας σε μια αυτόνομη μονάδα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιορισμένου μεγέθους (συγκεκριμένα, σε μια φωτοβολταϊκή μονάδα παραγωγής ενέργειας). Ο εν λόγω σταθμός ηλεκτροπαραγωγής έχει σχεδιαστεί ειδικά για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων ενός σταθμού βάσης κινητών τηλεπικοινωνιών. Το αποτέλεσμα συνεπάγεται μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των εταιρικών επιδόσεων μέσω μιας δυναμικής ανάλυσης και μιας επαναληπτικής ολοκληρωμένης αξιολόγησης της βιωσιμότητας, όπως διατυπώνεται από τον Fabio (2016).

Η παρούσα μελέτη ενσωματώνει τις μεθοδολογίες της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής και της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής, προκειμένου να εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η αποδοτικότητα κόστους ενός υβριδικού

συστήματος ηλεκτροπαραγωγής με ηλιακή και αιολική ενέργεια. Η αξιοποίηση της βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων χρησιμοποιείται ως μέσο για την εξακρίβωση της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής και της ελαχιστοποίησης του κόστους του κύκλου ζωής. Τα ευρήματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση των ηλιακών και αιολικών ενεργειακών πόρων μπορεί να επιτύχει αποτελεσματικά μια αρμονική ισορροπία μεταξύ της οικονομικής βιωσιμότητας και της οικολογικής διατήρησης. Ο βέλτιστος σχεδιασμός απαιτεί τη συνεργατική ενσωμάτωση και των δύο τεχνολογικών τρόπων, αποδίδοντας έτσι μειωμένες οικολογικές επιπτώσεις και συμφέρουσες δαπάνες κύκλου ζωής (Wang, 2009).

6.2.

Μοντελοποίηση του κόστους κύκλου ζωής συμβατικών και εναλλακτικών οχημάτων

Κατά την προηγούμενη δεκαετία, ο τομέας των επιβατικών μεταφορών γνώρισε αξιοσημείωτους μετασχηματισμούς, ιδίως όσον αφορά τους μηχανισμούς πρόωσης που χρησιμοποιούν τα οχήματα. Οι προαναφερθείσες τροποποιήσεις υποκινήθηκαν από την παγκόσμια προσπάθεια για τον μετριασμό των οικολογικών επιπτώσεων που συνδέονται με τη λειτουργία των οχημάτων. Ενώ η κυρίαρχη εστίαση αυτών των τάσεων έγκειται στις περιβαλλοντικές πτυχές της λειτουργίας των οχημάτων, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί ότι οι οικονομικές διαστάσεις που συνδέονται εγγενώς με τη λειτουργία κάθε οχήματος υφίστανται επίσης μετασχηματισμό. Η παρούσα μελέτη αφορά τον υπολογισμό των δαπανών του κύκλου ζωής, και συγκεκριμένα την εκτίμηση της απόδοσης της επένδυσης για οχήματα εξοπλισμένα με εναλλακτικά συστήματα κίνησης σε σύγκριση με εκείνα που χρησιμοποιούν συμβατικές μονάδες κίνησης. Η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου για τον υπολογισμό των δαπανών κύκλου ζωής των

επιβατικών οχημάτων έχει αναληφθεί προκειμένου να επιτευχθούν αμερόληπτα αποτελέσματα (Weldon, Morrissey, & O'Mahony, 2018). Το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ διατυπώνει τις δαπάνες που σχετίζονται με την απόκτηση, με ιδιαίτερη έμφαση στο κόστος ιδιοκτησίας που αφορά τη λειτουργία και τη συντήρηση. Τελικά, διενεργήθηκε μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση για τη σύγκριση του συνόλου των δαπανών του κύκλου ζωής που αφορούν διάφορα οχήματα εξοπλισμένα με διαφορετικές τεχνολογίες κινητήριων συστημάτων. Η παρούσα μελέτη περιελάμβανε συγκριτική ανάλυση διαφόρων συστημάτων μετάδοσης κίνησης, δηλαδή του βενζινοκινητήρα, του πετρελαιοκινητήρα, του κινητήρα βενζίνης και CNG, του ήπιου υβριδικού κινητήρα, του plug-in υβριδικού κινητήρα και του ηλεκτροκινητήρα. Υπό το πρίσμα της ταχείας προόδου και βελτίωσης των εναλλακτικών μεθόδων πρόωσης, ιδίως στον τομέα των αμιγώς ηλεκτρικών τεχνολογιών πρόωσης, είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι το κόστος κύκλου ζωής θα παρουσιάζει φθίνουσα πορεία (Furch, Konečný, & Krobot, 2022).

Η παρούσα μελέτη επιχειρεί να αξιολογήσει την περιβαλλοντική και οικονομική αποτελεσματικότητα των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων. Αξιοποιείται η εφαρμογή της βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων προκειμένου να διαπιστωθεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση της μπαταρίας και η κατανομή της ισχύος του κινητήρα. Τα ευρήματα δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί μια αρμονική ισορροπία μεταξύ της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της ελαχιστοποίησης του κόστους κύκλου ζωής μέσω της βελτιστοποίησης των σχεδίων υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (HEV). Η βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης της μπαταρίας και της κατανομής της ισχύος του κινητήρα είναι υψίστης σημασίας για την επίτευξη της βέλτιστης ισορροπίας (Harrison, GómezVilchezandThiel, 2018).

6.3. Συστήματα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας από βιομάζα

Διερευνάται ένα πλαίσιο μοντελοποίησης προκειμένου να εξεταστούν οι αντισταθμίσεις που συνδέονται με τις προσπάθειες απαλλαγής από τον άνθρακα που προκύπτουν από την επέκταση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα και την ηλεκτροδότηση των συστημάτων θέρμανσης και μεταφορών. Το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζει ευρύ φάσμα εφαρμοσιμότητας, αν και εξαρτάται από την ακριβή παραμετροποίηση της επικρατούσας υποδομής και των προβλεπόμενων ηλεκτροδοτούμενων φορτίων. Στην παρούσα έρευνα, το εν λόγω μοντέλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση του πλαισίου της Πολιτείας της Νέας Υόρκης, αξιοποιώντας τη διαθεσιμότητα ολοκληρωμένων και περίπλοκων δεδομένων. Η έρευνα εμβαθύνει στα αντισταθμιστικά οφέλη που προκύπτουν όταν εξετάζεται η ηλεκτροδότηση των τελικών χρήσεων και η ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι εν λόγω αντισταθμίσεις εξετάζονται σε σχέση με το κόστος εφοδιασμού, τις δυνατότητες παραγωγής και αποθήκευσης, το μείγμα ανανεώσιμων πόρων και τη λειτουργία του συνολικού συστήματος. Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι, δίνοντας προτεραιότητα στον εξηλεκτρισμό με 40-70% παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, είναι δυνατόν να επιτευχθούν συγκρίσιμες μειώσεις εκπομπών με πιο αποδοτικό για το δίκτυο ρυθμό, σε αντίθεση με την επιδίωξη πλήρους απαλλαγής του δικτύου από τις εκπομπές άνθρακα. Σύμφωνα με τους Conlon και συν. (2022), έχει παρατηρηθεί ότι με την επίτευξη ενός ποσοστού εξηλεκτρισμού 60% και τη διασφάλιση ότι το 50% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλών εκπομπών άνθρακα, είναι δυνατόν να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών κατά περίπου ένα τρίτο, ενώ παράλληλα διατηρείται ανέπαφο το σημερινό κόστος εφοδιασμού. Ωστόσο, εάν το ποσοστό εξηλεκτρισμού μειωθεί στο 20%, ένα σημαντικά υψηλότερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, συγκεκριμένα 90%, καθίσταται απαραίτητο προκειμένου να επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο μείωσης των εκπομπών. Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κόστους του δικτύου κατά 43%. Επιπλέον, είναι επιτακτική ανάγκη να

αναγνωριστεί ο εντοπισμός τριών θεμελιωδών παραγόντων κόστους που αφορούν ένα σύστημα που βρίσκεται σε διαδικασία αποανθρακοποίησης:

- μείωση του κόστους ανά μονάδα της υφιστάμενης υποδομής με την αύξηση της ηλεκτροκίνητης ζήτησης
- υψηλότερο κόστος παραγωγής εντός της πολιτείας από πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα σε σχέση με την παραγωγή με βάση το φυσικό αέριο και την υδροηλεκτρική ενέργεια
- αυξανόμενο κόστος ενσωμάτωσης σε υψηλά ποσοστά ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

Η παρούσα μελέτη διερευνά τη χρήση συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP) από βιομάζα ως μέσο ενσωμάτωσης μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας στην υπάρχουσα υποδομή του δικτύου. Η μελέτη που διεξήχθη από τους Conlon και συν. (2022) χρησιμοποιεί μια μεθοδολογία βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων για να εξετάσει τις εγγενείς αντισταθμίσεις μεταξύ της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενσωματώνοντας τις τεχνικές αξιολόγησης κύκλου ζωής (AKZ) και ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής (AKZ).

Τα ευρήματα της έρευνας υποδεικνύουν ότι τα συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας από βιομάζα (CHP) διαθέτουν σημαντικές δυνατότητες ως πολύτιμο μέσο για την ολοκλήρωση των δικτύων. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να σημειωθεί ότι ο ιδανικός σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων εξαρτάται από συγκεκριμένες προτεραιότητες, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, της ελαχιστοποίησης των εκπομπών, της μείωσης του κόστους ή της ενίσχυσης της σταθερότητας του δικτύου.

6.4. Υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές

Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να εξετάσει την έννοια της ενεργειακής βιωσιμότητας διερευνώντας τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε δύο πολλά υποσχόμενες πόλεις που βρίσκονται στη νοτιοανατολική περιοχή του Ιράν, με ιδιαίτερη έμφαση στο προβλεπόμενο χρονικό πλαίσιο του 2030. Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιείται η χρήση του λογισμικού Homer για την αξιολόγηση των οικονομικών και τεχνικών αναλύσεων που αφορούν ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών, αιολικής ενέργειας και ντίζελ σε δύο διαφορετικές πόλεις. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση αυτή λαμβάνονται από τον αξιολόγο μετεωρολογικό οργανισμό του Ιράν. Στο εξής, η μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα για τις τοποθεσίες Zabol και Zahak παρατηρήθηκε ότι είναι περίπου 9 και 9,1 (ώρες ανά ημέρα), αντίστοιχα. Επιπλέον, οι μέσες ταχύτητες ανέμου στις περιοχές Zabol και Zahak υπολογίζονται σε 5,35 m/s και 4,7 m/s, αντίστοιχα. Αυτό υποδηλώνει ότι οι πόλεις αυτές παρουσιάζουν σημαντικό δυναμικό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της χρήσης ενός υβριδικού συστήματος. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η φωτοβολταϊκή συστοιχία στο Zabol παρουσίασε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 1700 κιλοβατώρες ετησίως, ενώ στο Zahak παράγαγε 1669 κιλοβατώρες ετησίως. Ομοίως, η ανεμογεννήτρια στο Zabol συνέβαλε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 9036 κιλοβατώρες ετησίως, ενώ στο Zahak απέδωσε 7263 κιλοβατώρες ετησίως (Razmjooetal., 2019). Ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί ότι η κατανομή των πόρων προς τους τομείς της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας και στις δύο αστικές περιοχές θα ήταν οικονομικά ορθολογική. Δεδομένης της πρωταρχικής σημασίας κρίσιμων παραγόντων όπως η ενεργειακή ασφάλεια και το πιεστικό ζήτημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη για τη διαμόρφωση του μέλλοντος, είναι επιτακτική ανάγκη να επιδιωχθεί σχολαστικός μακροπρόθεσμος σχεδιασμός όσον αφορά τις επενδύσεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπλέον, η εγκατάσταση σταθμών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις εν λόγω καθορισμένες περιοχές δεν είναι μόνο κατάλληλη αλλά και με ουσιαστική οικονομική

δικαίωση, όπως επισημαίνεται από την έρευνα που διεξήγαγαν οι MojtabaQolipour και συν. το 2016.

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης αναλαμβάνει την ανάλυση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που έχει σχεδιαστεί με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Η προτεινόμενη προσέγγιση ενσωματώνει τις μεθοδολογίες ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής (LCCA) και αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA), χρησιμοποιώντας τεχνικές βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων για την αποτελεσματική εναρμόνιση των εκτιμήσεων τόσο των οικονομικών παραγόντων όσο και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός συστήματος ή προϊόντος. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της ακριβούς διαστασιολόγησης του συστήματος και της σχολαστικής επιλογής των εξαρτημάτων που ασκούν ουσιαστική επίδραση στο κόστος κύκλου ζωής και στην περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα των συστημάτων παραγωγής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Η χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων μπορεί να αποδειχθεί καθοριστική για την επίτευξη των επιθυμητών συμβιβασμών (Mollahosseinietal., 2017).

Συμπέρασμα

Η εξέταση των αυτοδιαχειριζόμενων και διασυνδεδεμένων υβριδικών συστημάτων, ειδικά στο πεδίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της αειφορίας, αποδίδει σημαντικές αποκαλύψεις σχετικά με την πρόοδο προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό τοπίο. Οι προαναφερθείσες προσεγγίσεις διαθέτουν διακριτά χαρακτηριστικά και χρήσεις, και αναλαμβάνουν καίριες λειτουργίες στην επιδίωξη της περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας. Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα, που συνήθως αναφέρονται ως μη διασυνδεδεμένα συστήματα, είναι σχολαστικά σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν αυτόνομα, αποκομμένα από τα όρια των κεντρικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικές εφαρμογές αυτών των συστημάτων παρατηρούνται σε γεωγραφικά απομακρυσμένες περιοχές, σε απομονωμένες κοινότητες ή σε συγκεκριμένα πλαίσια όπου η προσβασιμότητα στο συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί σημαντική πρόκληση. Τα συστήματα αυτά παρέχουν ένα ορισμένο επίπεδο ενεργειακής αυτονομίας, μετριάζοντας έτσι την εξάρτηση από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και υποστηρίζοντας τη χρήση βιώσιμων ενεργειακών πόρων. Έχουν ιδιαίτερη σημασία σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από περιορισμένη ή αναξιόπιστη πρόσβαση σε ηλεκτρικά δίκτυα. Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα συμβάλλουν σημαντικά στην προώθηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας μέσω της αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δηλαδή της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας. Η αξιοποίηση αυτή μετριάξει αποτελεσματικά την έκλυση επιβλαβών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, προωθώντας έτσι ένα πιο οικολογικά ισορροπημένο περιβάλλον. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση της ενεργειακής ανθεκτικότητας, ιδίως σε απομακρυσμένες και απομονωμένες περιοχές.

Τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα, αντίθετα, είναι σκόπιμα σχεδιασμένα ώστε να διευκολύνουν την απρόσκοπτη ενσωμάτωση με τα κεντρικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλαμβάνουν κρίσιμη λειτουργία στην ισορροπία της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας, ιδίως σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη διασύνδεση δικτύων. Αυτά τα προαναφερθέντα συστήματα εξυπηρετούν

τον σκοπό της σταθεροποίησης του δικτύου, του μετριασμού των διακυμάνσεων στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και της παροχής εφεδρικής ενέργειας σε περίπτωση διακοπών. Το φαινόμενο αυτό εξυπηρετεί την ενίσχυση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του ηλεκτρικού δικτύου. Με τη συγχώνευση ανανεώσιμων και συμβατικών πηγών ενέργειας, τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να μετριάσουν τις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, να περιορίσουν τις ενεργειακές δαπάνες και να αυξήσουν τη συνολική βιωσιμότητα του δικτύου.

Τα αυτόνομα συστήματα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διευκόλυνση της παροχής βιώσιμης ενέργειας σε απομακρυσμένες και εκτός δικτύου περιοχές, προωθώντας έτσι την αυτοδυναμία και την υπεύθυνη διαχείριση του περιβάλλοντος. Σε πλήρη αντίθεση, η ενσωμάτωση διασυνδεδεμένων συστημάτων αναλαμβάνει πρωταρχικό ρόλο στην ενίσχυση της σταθερότητας του δικτύου, στη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ οικονομικής βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από ισχυρή υποδομή δικτύου. Η σύγκλιση αυτόνομων και διασυνδεδεμένων υβριδικών συστημάτων, σε συνδυασμό με τις γνώσεις που αποκτώνται από την ανάλυση κύκλου ζωής και την ανάλυση κόστους κύκλου ζωής, θα αναλάβει καίρια θέση στη διαμόρφωση ενός περιβαλλοντικά βιώσιμου και ισχυρού ενεργειακού πλαισίου.

Βιβλιογραφία

A.L. Schmid, C. Augusto and A. Hoffmann (2004). Replacing diesel by solar in the Amazon: short-term economic feasibility of PV-diesel hybrid systems, *Energy Policy* 32, pp 881-898.

Adaramola, M.S., Paul, S.S. and Oyewola, O.M. (2014). Assessment of decentralized hybrid PV solar-diesel power system for applications in Northern part of Nigeria. *Energy for Sustainable Development*, [online] 19, pp.72–82. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.12.007>.

Agraniotis, M., Karellas, S., Violidakis, I., Doukelis, A., Grammelis, P., & Kakaras, E. (2012). Investigation of pre-drying lignite in an existing Greek power plant. *Thermal Science*, 16(1), 283–296. <https://doiserbia.nb.rs/article.aspx?id=0354-98361100120a>

Banias, G., Batsioula, M., Achilles, C., Patsios, S. I., Kontogiannopoulos, K. N., Bochtis, D., & Moussiopoulos, N. (2020). A Life Cycle Analysis Approach for the Evaluation of Municipal Solid Waste Management Practices: The Case Study of the Region of Central Macedonia, Greece. *Sustainability*, 12(19), 8221. <https://doi.org/10.3390/su12198221>

Battilana, J., & Dorado, S. (2010). Building Sustainable Hybrid Organizations: The Case of Commercial Microfinance Organizations. *Academy of Management Journal*, 53(6), 1419–1440. <https://doi.org/10.5465/amj.2010.57318391>

Battilana, J., Sengul, M., Pache, A.-C., & Model, J. (2015). Harnessing Productive Tensions in Hybrid Organizations: The Case of Work Integration Social Enterprises. *Academy of Management Journal*, 58(6), 1658–1685. <https://doi.org/10.5465/amj.2013.0903>

Besharov, M. L., & Smith, W. K. (2014). Multiple Institutional Logics in Organizations: Explaining Their Varied Nature and Implications. *Academy of Management Review*, 39(3), 364–381. <https://doi.org/10.5465/amr.2011.0431>

- Bonesio, L. (2007). Paesaggio, identità e comunità tra locale e globale. *Www.torrossa.com*.
<https://www.torrossa.com/gs/resourceProxy?an=2250761&publisher=FRE075>
- Boukettaya, G., & Krichen, L. (2014). A dynamic power management strategy of a grid connected hybrid generation system using wind, photovoltaic and Flywheel Energy Storage System in residential applications. *Energy*, 71, 148–159.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.039>
- Branicky, M. S. (2005). *Introduction to Hybrid Systems*. 91–116.
https://doi.org/10.1007/0-8176-4404-0_5
- Bruni, L. (2020). Critique of Managerial Reason. *Humanistic Management Journal*.
<https://doi.org/10.1007/s41463-020-00100-y>
- C.V. Nayar, M. Ashari and W.W.L. Keerthipala (2000). A grid-interactive photovoltaic uninterruptible power supply system using battery storage and a backup diesel generator, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp 348-353.
- Chesney, M., Gheysens, J., Anca Claudia Pana, & Luca Taschini. (2016). *International Efforts to Tackle Climate Change*. 17–48. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48175-2_3
- Cho, S., & Kim, J. (2015). Feasibility and impact analysis of a renewable energy source (RES)-based energy system in Korea. *Energy*, 85, 317–328.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.081>
- Conlon, T., Waite, M., Wu, Y., & Modi, V. (2022). Assessing trade-offs among electrification and grid decarbonization in a clean energy transition: Application to New York State. *Energy*, 123787. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123787>
- Dacin, M. T., Dacin, P. A., & Tracey, P. (2011). Social Entrepreneurship: A Critique and Future Directions. *Organization Science*, 22(5), 1203–1213.
<https://doi.org/10.1287/orsc.1100.0620>
- Dong, Y., Ng, S. T., & Liu, P. (2021). A comprehensive analysis towards benchmarking of life cycle assessment of buildings based on systematic review.

Building and Environment, 204, 108162.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108162>

E.M. Nfah and J.M. Ngundam (2009). Feasibility of pico-hydro and photovoltaic hybrid power systems for remote villages in Cameroon, *Renewable Energy* 34, pp1445-1450.

Ekpeni, L. E. N., Benyounis, K. Y., Nkem-Ekpeni, F., Stokes, J., & Olabi, A. G. (2014). Energy Diversity through Renewable Energy Source (RES) – A Case Study of Biomass. *Energy Procedia*, 61, 1740–1747.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.202>

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *TOWARDS THE CIRCULAR ECONOMY Economic and business rationale for an accelerated transition*.
https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf

European Commission, 2020. Energy, Climate change, Environment. [Online] Available at: https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_el

European Commission. (2019). The Human-Centred City: Opportunities for Citizens through Research and Innovation.

European Parliament and Council of the EU. (2003). *Directive 2003/88/EC of the European Parliament and of the Council of 4 November 2003 concerning certain aspects of the organisation of working time*. Europa.eu. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32003L0088>

Eurostat, 2020. [Online] Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>

Fabio, F. (2016). Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system. *Renewable Energy*, 95(C), 337–355. <https://ideas.repec.org/a/eee/renene/v95y2016icp337-355.html>

Fadaeenejad, M., Radzi, M. A. M., AbKadir, M. Z. A. & Hizam, H., 2013. Assessment of hybrid renewable power sources for rural electrification in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 30, pp. 299-305

Fava, J. A., Smerek, A., Almut Beate Heinrich, & Laura. (2014). *The Role of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) in Life Cycle Assessment (LCA) Development and Application*. 39–83. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3_2

Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2011). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85(8), 1609–1628. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>

Furch, J., Konečný, V., & Krobot, Z. (2022). Modelling of life cycle cost of conventional and alternative vehicles. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14715-8>

Fusco Girard, L. (2012, October). The Cultural Base of Cities for Shaping a Better Future. In Acts of the International Meeting New urban world future challenges. Rabat, Maroc (pp. 164-171).

Gaines, L., & Cuenca, R. (2000, August 21). *Costs of lithium-ion batteries for vehicles*. www.osti.gov. <https://www.osti.gov/biblio/761281>

Gerbinet, S., Belboom, S., & Léonard, A. (2014). Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 747–753. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.043>

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A Review on Circular Economy: the Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems. *Journal of Cleaner Production*, 114(0959-6526), 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

Girard, L. F., Rosa, F. D., & Nocca, F. (2014). VERSO IL PIANO STRATEGICO DI UNA CITTA' STORICA: VITERBO. *BDC. Bollettino Del Centro Calza Bini*, 14(1), 11–37. <https://doi.org/10.6092/2284-4732/2663>

H. Paul Barringer, P.E., Barringer (2003), A Life Cycle Cost Summary, Humble, Texas USA. International Conference Of Maintenance Societies (ICOMS).

- Haigh, N., & Hoffman, A. J. (2011, October 1). *Hybrid Organizations: The Next Chapter in Sustainable Business*. Papers.ssrn.com. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2933616
- Halabi, L. M., Mekhilef, S., Olatomiwa, L., & Hazelton, J. (2017). Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: A case study Sabah, Malaysia. *Energy Conversion and Management*, 144, 322–339. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.070>
- Harrison, G., Gómez Vilchez, J. J., & Thiel, C. (2018). Industry strategies for the promotion of E-mobility under alternative policy and economic scenarios. *European Transport Research Review*, 10(2). <https://doi.org/10.1186/s12544-018-0296-6>
- Hatziargyriou, N. D., I. Skotinos, & Tsikalakis, A. G. (2005). *Status of integrating renewable electricity production in Greece, prospects and problems*. <https://doi.org/10.1109/ptc.2005.4524787>
- Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(4), 78–94. <https://doi.org/10.1109/mpae.2007.376583>
- He, X., Khan, S., Ozturk, I., & Murshed, M. (2023). The role of renewable energy investment in tackling climate change concerns: Environmental policies for achieving SDG -13. *Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1002/sd.2491>
- Headley Stewart Jacobus (2010). Solar-Diesel Hybrid Power System Optimization and Experimental Validation. Masters of Science, 2010. University Of Maryland, College Park.
- Hiendro, A. et al., 2013. Techno-economic analysis of photovoltaic/wind hybrid system for onshore/remote area in Indonesia. *Energy*, Volume 59, pp. 652-657.
- Hybrid Power Systems Based on Renewable Energies: A Suitable and Cost-Competitive Solution For Rural Electrification. Alliance For Rural Electrification, (2008).
- IRENA, 2020. Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

J.A. Duffie and W.A. Bechaman (1991). Solar engineering of thermal processes. John Wiley and Sons

J.S. Park, T. Katagi, S. Yamamoto and T. Hashimoto (2001). Operation control of photovoltaic/diesel hybrid generating system considering fluctuation of solar radiation, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 67, pp 535-547.

Jay, J. (2013). Navigating Paradox as a Mechanism of Change and Innovation in Hybrid Organizations. *Academy of Management Journal*, 56(1), 137–159. <https://doi.org/10.5465/amj.2010.0772>

Jungbluth, N., Bauer, C., Dones, R., & Frischknecht, R. (2004). Life Cycle Assessment for Emerging Technologies: Case Studies for Photovoltaic and Wind Power (11 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1), 24–34. <https://doi.org/10.1065/lca2004.11.181.3>

Katsaprakakis, D. Al., & Christakis, D. G. (2016). The exploitation of electricity production projects from Renewable Energy Sources for the social and economic development of remote communities. The case of Greece: An example to avoid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.029>

Katsivelakis, M., Bargiotas, D., Daskalopulu, A., Panapakidis, I. P., & Tsoukalas, L. (2021). Techno-Economic Analysis of a Stand-Alone Hybrid System: Application in Donoussa Island, Greece. *Energies*, 14(7), 1868. <https://doi.org/10.3390/en14071868>

Kellstedt, P. M., Zahran, S., & Vedlitz, A. (2008). Personal Efficacy, the Information Environment, and Attitudes Toward Global Warming and Climate Change in the United States. *Risk Analysis*, 28(1), 113–126. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01010.x>

Ketkar, S., & Ratha, D. (2008). Innovative Financing for Development. In *Google Books*. World Bank Publications. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=S05GWMg3vnIC&oi=fnd&pg=PR5&ots=bnfZJm_JlF&sig=AjOvbVkj4Izxo6bD8eL-SSfEUfl

- Klikauer, T. (2013). What Is Managerialism? *Critical Sociology*, 41(7-8), 1103–1119. <https://doi.org/10.1177/0896920513501351>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and Its Limitations. *Ecological Economics*, 143(1), 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Kumar, U. S. & Manoharan, P. S., 2014. Economic analysis of hybrid power systems (PV/diesel) in different climatic zones of Tamil Nadu. *Energy Conversion and Management*, Volume 80, pp. 469-476.
- Lee, K., & Jepson, W. (2021). Environmental impact of desalination: A systematic review of Life Cycle Assessment. *Desalination*, 509, 115066. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115066>
- Lüdeke-Freund, F., & Dembek, K. (2017). Sustainable business model research and practice: Emerging field or passing fancy? *Journal of Cleaner Production*, 168, 1668–1678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.093>
- M. Lenzen (1999). Greenhouse gas analysis of solar-thermal electricity generation. *Solar Energy* 65(6): 353-368.
- M.H. Nehrir, B.J. Lameris, G. Venkataramanan, V. Gerez and L.A. Alvarado (2000). An approach to evaluate the general performance of stand-alone wind/photovoltaic generating systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 15.
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2014). A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island. *Applied Energy*, 121, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.090>
- Magill, M. J. P., Quinzii, M., & Rochet, J.-C. (2013). A Critique of Shareholder Value Maximization. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2246797>
- Manninen, K., Koskela, S., Antikainen, R., Bocken, N., Dahlbo, H., & Aminoff, A. (2018). Do circular economy business models capture intended environmental value propositions? *Journal of Cleaner Production*, 171, 413–422. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.003>

- Martin, J., Petty, W., & Wallace, J. (2009). Shareholder Value Maximization-Is There a Role for Corporate Social Responsibility? *Journal of Applied Corporate Finance*, 21(2), 110–118. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6622.2009.00232.x>
- Martinez-Bolaños, J., Silva, V., Zucchi, M., Heideier, R., Relva, S., Saidel, M., & Fadigas, E. (2020). Performance Analysis of Topologies for Autonomous Hybrid Microgrids in Remote Non-Interconnected Communities in the Amazon Region. *Sustainability*, 13(1), 44. <https://doi.org/10.3390/su13010044>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1777–1790. <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v15y2011i4p1777-1790.html>
- Mies, A., & Gold, S. (2021). Mapping the social dimension of the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128960>
- Mojtaba Qolipour, Mostafaeipour, A., Shahaboddin Shamshirband, Alavi, O., Goudarzi, H., & Dalibor Petković. (2016). Evaluation of wind power generation potential using a three hybrid approach for households in Ardebil Province, Iran. 118, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.007>
- Mollahosseini, A., Hosseini, S. A., Jabbari, M., Figoli, A., & Rahimpour, A. (2017). Renewable energy management and market in Iran: A holistic review on current state and future demands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 774–788. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.236>
- Moreau, V., Sahakian, M., van Griethuysen, P., & Vuille, F. (2017). Coming Full Circle: Why Social and Institutional Dimensions Matter for the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 497–506. <https://doi.org/10.1111/jiec.12598>
- Moreno, M., De los Rios, C., Rowe, Z., & Charnley, F. (2016). A Conceptual Framework for Circular Design. *Sustainability*, 8(9), 937. <https://doi.org/10.3390/su8090937>

N. Phuangpornpitak and S. Kumar (2007). PV hybrid systems for rural electrification in Thailand, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 11, pp 1530-1543.

Nesterova, I. (2020). Degrowth business framework: Implications for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121382. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121382>

Odeh, N. A., & Cockerill, T. T. (2008). Life cycle analysis of UK coal fired power plants. *Energy Conversion and Management*, 49(2), 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.014>

Oikonomou, E. K., Kiliadis, V., Goumas, A., Rigopoulos, A., Karakatsani, E., Damasiotis, M., Papastefanakis, D., & Marini, N. (2009). Renewable energy sources (RES) projects and their barriers on a regional scale: The case study of wind parks in the Dodecanese islands, Greece. *Energy Policy*, 37(11), 4874–4883. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.050>

Pache, A.-C., & Santos, F. (2010). When Worlds Collide: The Internal Dynamics of Organizational Responses to Conflicting Institutional Demands. *Academy of Management Review*, 35(3), 455–476. <https://doi.org/10.5465/amr.35.3.zok455>

Paska, J., Biczek, P., & Kłos, M. (2009). Hybrid power systems – An effective way of utilising primary energy sources. *Renewable Energy*, 34(11), 2414–2421. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.018>

Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 31(1), 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.002>

Piekut, M. (2021). The Consumption of Renewable Energy Sources (RES) by the European Union Households between 2004 and 2019. *Energies*, 14(17), 5560. <https://doi.org/10.3390/en14175560>

Psomopoulos, C. S., Ioannidis, G. Ch., Kaminaris, S. D., Mardikis, K. D., & Katsikas, N. G. (2015). A Comparative Evaluation of Photovoltaic Electricity Production

Assessment Software (PVGIS, PVWatts and RETScreen). *Environmental Processes*, 2(S1), 175–189. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0092-4>

R. Chedid and S. Rahman (1997). Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 12, pp79-85.

R. Ruther, A.L. Schmid, H.G. Beyer, A.A. Montenegro and H.F. Oliveira (2003). Cutting on Diesel, boosting PV: The potential of hybrid Diesel/PV systems in existing mini-grids in the Brazilian Amazon.

Razmjoo, A., Shirmohammadi, R., Davarpanah, A., Pourfayaz, F., & Aslani, A. (2019). Stand-alone hybrid energy systems for remote area power generation. *Energy Reports*, 5, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.01.010>

Rosa, P., Sassanelli, C., & Terzi, S. (2019). Towards Circular Business Models: A systematic literature review on classification frameworks and archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117696. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117696>

Rose, C. M. (2020). Thinking about the Commons. *International Journal of the Commons*, 14(1), 557–566. <https://doi.org/10.5334/ijc.987>

S. Ashok (2007). Optimised model for community-based hybrid energy system, *Renewable Energy* 32, pp1155-1164.

Sagani, A., Mihelis, J., & Dedoussis, V. (2017). Techno-economic analysis and life-cycle environmental impacts of small-scale building-integrated PV systems in Greece. *Energy and Buildings*, 139, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.022>

Sánchez, V. M., & Martínez, G. L. (2018). Constitutional profiles of the encyclical letter “Laudato Si”: An analysis from economic anthropology. *Rev. Direito Bras*, 20, 364-377.

Santori, P. (2021). Is Relationality Always Other-Oriented? Adam Smith, Catholic Social Teaching, and Civil Economy. *Philosophy of Management*. <https://doi.org/10.1007/s40926-021-00175-z>

- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, 17, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002>
- Sawle, Y., Gupta, S. C., & Bohre, A. K. (2018). Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2217–2235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.033>
- Schaltegger, S., Freund, F. L., & Hansen, E. G. (2012). Business cases for sustainability: the role of business model innovation for corporate sustainability. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 6(2), 95. <https://doi.org/10.1504/ijisd.2012.046944>
- Schaltegger, S., Hansen, E. G., & Lüdeke-Freund, F. (2016). Business Models for Sustainability. *Organization & Environment*, 29(1), 3–10. <https://doi.org/10.1177/1086026615599806>
- SCHLAGER, E. (2002). Rationality, Cooperation, and Common Pool Resources. *American Behavioral Scientist*, 45(5), 801–819. <https://doi.org/10.1177/0002764202045005005>
- Schuldt, J. P., Konrath, S. H., & Schwarz, N. (2011). “Global warming” or “climate change”? Whether the planet is warming depends on question wording. *Public Opinion Quarterly*, 75(1), 115–124. <https://doi.org/10.1093/poq/nfq073>
- Shaahid, S. M. & Elhadidy, M. A., 2003. Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic + diesel + battery) power systems in hot climates. *Renewable Energy*, 28(11), pp. 1741-1753.
- Shaahid, S. M. & Elhadidy, M. A., 2007. Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for commercial loads in desert environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), pp. 1794-1810.

Shaahid, S. M., Al-Hadhrami, L. M. & Rahman, M. K., 2014. Review of economic assessment of hybrid photovoltaic-diesel-battery power systems for residential loads for different provinces of Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 31, pp. 174- 181.

Shahzad, M. K., Zahid, A., ur Rashid, T., Rehan, M. A., Ali, M., & Ahmad, M. (2017). Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software. *Renewable Energy*, 106, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.033>

Shaik, A., Wong, M. L. D. & Choo, C. M., 2018. Environmental Life Cycle Assessment of a Standalone Hybrid Energy Storage System for Rural Electrification, Putrajaya: ResearchGate

Souliotis, M., Arnaoutakis, N., Panaras, G., Kavga, A., & Papaefthimiou, S. (2018). Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications. *Renewable Energy*, 126, 708–723. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.011>

Tambunan, H. B., Hakam, D. F., Prahastono, I., Pharmatrisanti, A., Purnomoadi, A. P., Aisyah, S., Wicaksono, Y., & Sandy, I. G. R. (2020). The Challenges and Opportunities of Renewable Energy Source (RES) Penetration in Indonesia: Case Study of Java-Bali Power System. *Energies*, 13(22), 5903. <https://doi.org/10.3390/en13225903>

Üçtuğ, F. G. & Azapagic, A., 2018. Environmental impacts of small-scale hybrid energy systems: Coupling solar photovoltaics and lithium-ion batteries. *Science of The Total Environment*, Volume 643, pp. 1579-1589.

Valenzuela, F., & Böhm, S. (2017). Against wasted politics: a critique of the circular economy. *Ephemera: Theory & Politics in Organization*, 17(1), 23–60. <https://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/30441/>

Vamvuka, D., & Galetakis, M. (2010). Carbon Dioxide Emissions from Coal-Fired Power Plants in Greece in Relation to Mined Lignite Quality. *Energy & Fuels*, 24(2), 1396–1401. <https://doi.org/10.1021/ef900702b>

Wang,. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v13y2009i9p2263-2278.html>

Weldon, P., Morrissey, P., & O’Mahony, M. (2018). Long-term cost of ownership comparative analysis between electric vehicles and internal combustion engine vehicles. *Sustainable Cities and Society*, 39, 578–591. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.024>

Y.L. Karnavas and D.P. Papadopoulos (1999). “Maintenance oriented Algorithm for economic operation of an autonomous diesel electric station” *Electric Power Systems Research*, Vol.5, pp109-122.

Yanine, F. F., & Sauma, E. E. (2013). Review of grid-tie micro-generation systems without energy storage: Towards a new approach to sustainable hybrid energy systems linked to energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 60–95. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.002>

Zackrisson, M. (2009). Product orientation of environmental work - barriers & incentives. *Www.diva-Portal.org*. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:219837>

Zackrisson, M., Avellán, L., & Orlenius, J. (2010). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1519–1529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004>

Zhang, X., Lovati, M., Vigna, I., Widén, J., Han, M., Gal, C., & Feng, T. (2018). A review of urban energy systems at building cluster level incorporating renewable-energy-source (RES) envelope solutions. *Applied Energy*, 230, 1034–1056. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.041>

Zohuri, B., 2018. Hybrid Renewable Energy Systems. In: Hybrid Energy Systems. s.l.:Springer, Cham.