



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

**Μελέτη εγκατάστασης σταθμών Α.Π.Ε. (Φωτοβολταϊκών Πάρκων κ.α.) και
συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και διασύνδεσή τους στο δίκτυο
ηλεκτρικής ενέργειας.**



Φοιτητής: Ρέππας Γεώργιος

ΑΜ: 06983

Επιβλέπων Καθηγητής: Βόκας Γεώργιος

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Οκτώβριος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Thesis

Case study for the installation of RES and energy storage systems and their interconnection in the electric network.



Student: Reppas George

Registration Number: 06983

Supervising Professor: Vokas Georgios (Professor)

ATHENS-EGALEO, (October) (2023)

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

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΟΚΑΣ Καθηγητής	ΚΑΜΙΝΑΡΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ Καθηγητής	ΚΑΡΑΪΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ Αναπλ. Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Ρέππας Γεώργιος),
Οκτώβριος, 2023**

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

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ρέππας Γεώργιος του Αθανασίου, με αριθμό μητρώου 06983 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου. Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο Δηλών
(Ονοματεπώνυμο φοιτητή/ήτριας)



(Υπογραφή φοιτητή/ήτριας)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στα ενεργειακά δίκτυα αποτελεί απόδειξη της παγκόσμιας μετάβασης προς βιώσιμες ενεργειακές λύσεις. Η Ελλάδα, με την άφθονη ηλιακή ακτινοβολία, βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της αξιοποίησης της φωτοβολταϊκής (PV) ενέργειας. Η παρούσα διπλωματική εργασία εμβαθύνει στη συγκριτική ανάλυση τριών διακριτών φωτοβολταϊκών συστημάτων και τη βιωσιμότητά τους ως συνάρτηση της αποθήκευσης ενέργειας και της διασυνδεσιμότητας του δικτύου. Τα συστήματα που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 85,6kWp χωρίς μπαταρίες με ενεργειακό συμψηφισμό και με δυνατότητα έγχυσης στο δίκτυο, ένα αυτόνομο σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 154kWp με μπαταρίες ονομαστικής χωρητικότητας 1.398,3kWh και ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 87,5kWp με μπαταρίες ονομαστικής χωρητικότητας 77,1kWh με ενεργειακό συμψηφισμό και με δυνατότητα έγχυσης στο δίκτυο.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις κατέδειξαν την αξία της ενσωμάτωσης διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, με το αυτόνομο σύστημα να προκύπτει οικονομικά μη βιώσιμο. Συγκρίνοντας τα συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού με και χωρίς διάταξη αποθήκευσης ενέργειας προκύπτει ότι αμφότερα είναι οικονομικά βιώσιμα, με το σύστημα χωρίς αποθήκευση ενέργειας να παρουσιάζει μικρότερη οικονομική απόδοση σε σχέση με το σύστημα με μπαταρία, μικρότερο κόστος επένδυσης και κάλυψη των ιδιοκαταναλώσεων με μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ. Στο σενάριο της λειτουργίας ανταγωνιστικής αγοράς ενέργειας με την τιμή της ενέργειας να αυξάνεται στις ώρες αιχμής είναι αναμενόμενο το σύστημα με διάταξη αποθήκευσης ενέργειας να αποδώσει ακόμα καλύτερα οικονομικά καθώς οι καταναλωτές μπορούν να διαχειρίζονται την ενέργεια και να καταναλώνουν αποθηκευμένη ενέργεια μόνον σε ώρες αιχμής. Στις παρούσες προσομοιώσεις έγινε η επιλογή ώστε οι μπαταρίες να φορτίζουν όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας και να εκφορτίζουν όταν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας. Το δε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα θα μπορούσε να καταστεί βιώσιμο αν συνδυαζόταν είτε με μία ακόμη πηγή ενέργειας, προκειμένου να παράγεται ενέργεια και κατά τις νυχτερινές ώρες, όπως π.χ. ανεμογεννήτρια είτε αν συνδυαζόταν με μία γεννήτρια diesel προκειμένου να καλύπτει αιχμές στη ζήτηση.

Η θεωρητική εξερεύνηση γύρω από τα φωτοβολταϊκά και την αποθήκευση μπαταριών αποκάλυψε τα πολλαπλά οφέλη τέτοιων ρυθμίσεων, από την εξομάλυνση του ενεργειακού εφοδιασμού έως τη βελτίωση της ευστάθειας και αξιοπιστίας των δικτύων. Επιπλέον,

τονίστηκε η σκοπιμότητα αυτών των σχημάτων στο ελληνικό πλαίσιο, προσφέροντας πληροφορίες σχετικά με την ευκολία υλοποίησης σχετικών επενδυτικών σχεδίων.

Συνοπτικά, καθώς η Ελλάδα κινείται προς ένα αυξημένο αποτύπωμα ΑΠΕ, η συγχώνευση των φωτοβολταϊκών με την αποθήκευση ενέργειας, σε συνδυασμό με τη διασυνδεσιμότητα του δικτύου, αναδεικνύεται σε κομβική στρατηγική. Η έρευνα αυτή όχι μόνο υπογραμμίζει τα οικονομικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα τέτοιων ρυθμίσεων, αλλά ενισχύει και την ανάγκη για πιο ολοκληρωμένα επενδυτικά σχέδια που θα καλύπτουν το μοναδικό ενεργειακό τοπίο της χώρας.

ABSTRACT

The burgeoning penetration of Renewable Energy Sources (RES) in energy grids is a testament to the global transition towards sustainable energy solutions. Greece, with its ample sunlight, stands at the forefront of harnessing photovoltaic (PV) energy. This thesis delves into the comparative analysis of three distinct photovoltaic systems and their viability as a function of energy storage and grid interconnectivity. The systems studied include a photovoltaic system with installed capacity of 85.6kWp without batteries with energy offsetting and with the possibility of injection into the grid, an autonomous system with installed capacity of 135kWp with batteries with a nominal capacity of 2,056kWh and a photovoltaic system with installed capacity of 87.5kWp with batteries with a nominal capacity of 77.1kWh with energy offset and with the possibility of injection into the network.

The results from the simulations demonstrated the value of integrating energy storage devices into interconnected photovoltaic systems, with the autonomous system becoming economically unviable. Comparing net metering systems with and without an energy storage device shows that both are economically viable, with the system without energy storage showing worse economic efficiency, lower investment costs and covering self-consumption with less installed capacity. In the scenario of a competitive energy market operation with the price of energy rising at peak hours, it is expected that the system with an energy storage device will perform better economically as consumers can manage energy and consume stored energy only at peak hours. In the present simulations, the choice was made to charge batteries when there is excess energy and discharge when there is an energy deficit. The autonomous photovoltaic system could be made viable if it were combined either with another energy source to produce energy at night, such as a wind turbine, or if it was combined with a diesel generator to meet peaks in demand. Theoretical exploration around photovoltaics and battery storage unveiled the manifold benefits of such setups, from smoothing out energy supply to enabling flexibility in energy dispatch. Furthermore, the feasibility of these configurations in the Greek context was accentuated, offering insights into the ease of implementing associated investment plans.

In summary, as Greece moves towards an increased RES footprint, the amalgamation of photovoltaics with energy storage, complemented by grid interconnectivity, emerges as a pivotal strategy. This research not only emphasizes the economic and operational advantages of such setups but also reinforces the need for more comprehensive investment plans catering to the country's unique energy landscape.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	viii
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	x
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xi
ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	xii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	3
1.1. Πηγές ενέργειας και ενεργειακά αποθέματα	3
1.1.1. Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.....	5
1.1.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ	7
1.2. Εξοικονόμηση και ορθολογική χρήση της ενέργειας	9
1.3. Η σημασία του ενεργειακού σχεδιασμού	11
1.4. Ο ρόλος των ΑΠΕ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	18
2.1 Αρχή λειτουργίας.....	18
2.2 Τεχνολογίες και υλικά φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	29
3.1 Αναγκαιότητα αποθηκευτικής διάταξης σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές	29
3.2 Αρχή λειτουργίας και δομή συσσωρευτών	36
3.3 Είδη συσσωρευτών.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΑΠΕ	44
4.1 Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου.....	44
4.2 Διασυνδεδεμένα (on-grid) συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	46
4.3 Αυτόνομα (off-grid) συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	49
4.4 Το θεσμικό πλαίσιο και η ισχύουσα νομοθεσία	51

4.5 Διαδικασίες υποβολής επενδυτικών σχεδίων	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΠΕ	54
5.1 Η παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα	54
5.2 Μελέτη εγχώριων φωτοβολταϊκών πάρκων σε λειτουργία	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Σύγκριση Φ/Β συστημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά	61
6.1 ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Ενεργειακός συμψηφισμός χωρίς αποθήκευση ενέργειας με έγχυση ενέργειας στο δίκτυο και με προσπάθεια μηδενικής δωρεάς ενέργειας στο δίκτυο	62
6.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Πλήρως αυτόνομο σύστημα με αυτονομία 2 ημερών	72
6.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Ενεργειακός συμψηφισμός με μπαταρία και με δυνατότητα έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο	81
6.4 Συζήτηση	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	98

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας (Jamil & Bellos, 2019)	19
Εικόνα 2: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Brus, 1984)	20
Εικόνα 3: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης (Izadian, Pourtaherian, & Motahari, 2012)	20
Εικόνα 4: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικής φωτοβολταϊκής κυψέλης (Izadian, Pourtaherian, & Motahari, 2012).....	21
Εικόνα 5: Φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού (αριστερά), πολυκρυσταλλικού (δεξιά) και άμορφου πυριτίου (δεξιά) (EnergySage, 2023)	24
Εικόνα 6: Τρόπος κατασκευής φωτοβολταϊκών πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου (αριστερά) και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (δεξιά) (EnergySage, 2023)	26
Εικόνα 7: Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΔΜΗΕ, 2023)	45
Εικόνα 8: Ηλιακό δυναμικό στην Ευρώπη (Solargis, 2019)	54
Εικόνα 9: Μονογραμμικό διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος.....	67
Εικόνα 10: Μονογραμμικό διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος.....	87

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση μπαταριών μόλυβδου οξέος και λιθίου ιόντων (Yanamandra, Pinisetty, Daoud, & Gupta, 2022)	39
Πίνακας 2: Σύνολο ισχύος αδειών παραγωγών ΑΠΕ και πλήθος αδειών ΑΠΕ από το 2001	59
Πίνακας 3: Πλήθος αδειών, εγκατεστημένη ισχύς, εγκατεστημένη και εγγυημένη χωρητικότητα μονάδων ΑΠΕ με ενσωματωμένη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από το δίκτυο	59
Πίνακας 4: Πλήθος αδειών, εγκατεστημένη ισχύς, εγκατεστημένη και εγγυημένη χωρητικότητα μονάδων ΑΠΕ με ενσωματωμένη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, με τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από το δίκτυο	60
Πίνακας 5: Στοιχεία ιδιοκαταναλώσεων	61
Πίνακας 6: Σύνοψη συστήματος	63
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά συστήματος	64
Πίνακας 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης	65
Πίνακας 9: Κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος	68
Πίνακας 10: Οικονομική ανάλυση	69
Πίνακας 11: Πίνακας χρηματοροών	70
Πίνακας 12: Ισοζύγιο εκπομπής ρύπων CO ₂	71
Πίνακας 13: Σύνοψη συστήματος	73
Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά συστήματος	74
Πίνακας 15: Αποτελέσματα προσομοίωσης	75
Πίνακας 16: Κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος	78
Πίνακας 17: Οικονομική ανάλυση	79
Πίνακας 18: Πίνακας χρηματοροών	80
Πίνακας 19: Σύνοψη συστήματος	82
Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά συστήματος	83

Πίνακας 21: Χαρακτηριστικά συστήματος.....	84
Πίνακας 22: Αποτελέσματα προσομοίωσης	85
Πίνακας 23: Κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος.....	88
Πίνακας 24: Οικονομική ανάλυση	89
Πίνακας 25: Πίνακας χρηματοροών	89
Πίνακας 26: Ισοζύγιο εκπομπής ρύπων CO ₂	90
Πίνακας 27: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 3 σεναρίων.....	91
Πίνακας 28: Ετήσια εξοικονόμηση και ετήσια επιβάρυνση για μεταφορά και διανομή .	93

ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1: Καμπύλη I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης (Salas, Barrado, & Lazaro, 2006).	21
Γράφημα 2: Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης για διαφορετικές θερμοκρασίες κυψέλης (Hady, 2017)	23
Γράφημα 3: Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης για διαφορετική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (Hady, 2017).....	23
Γράφημα 4: Ετήσια και συνολική συνδεδεμένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022).....	55
Γράφημα 5: Αριθμός συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022).....	56
Γράφημα 6: Συγκεντρωτικά μερίδια αγοράς συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022).....	56
Γράφημα 7: Επενδύσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022)	57
Γράφημα 8: Εξέλιξη μέσου κόστους επένδυσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022).....	57
Γράφημα 9: Μερίδιο φωτοβολταϊκών στην εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022).....	58

Γράφημα 10: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022).....	58
Γράφημα 11: Διάγραμμα απωλειών ενέργειας.....	66
Γράφημα 12: Γραφήματα παραγωγής και κατανομής παραγόμενης ενέργειας	67
Γράφημα 13: Ετήσια κέρδη και σωρευτικές ταμειακές ροές.....	70
Γράφημα 14: Διάγραμμα απωλειών ενέργειας.....	77
Γράφημα 15: Διαθέσιμη και παραγόμενη ενέργεια	77
Γράφημα 16: Ετήσια κέρδη και σωρευτικές ταμειακές ροές.....	80
Γράφημα 17: Διάγραμμα απωλειών ενέργειας.....	86
Γράφημα 18: Γραφήματα παραγωγής και κατανομής παραγόμενης ενέργειας	87
Γράφημα 19: Ετήσια κέρδη και σωρευτικές ταμειακές ροές.....	90

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενεργειακή κρίση των τελευταίων ετών η οποία, μετά τα πρόσφατα γεγονότα στην Ουκρανία εντάθηκε ακόμα περισσότερο, είναι στο επίκεντρο των ενεργειακών πολιτικών παγκοσμίως. Η αύξηση του φαινομένου της ενεργειακής φτώχειας και η ανησυχία για το μέλλον των ορυκτών καυσίμων, κάνουν επιτακτική την ανάγκη για εξεύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, κυρίως σε ηλεκτρική ενέργεια, με τη μετάβαση προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας να παρουσιάζεται ως η ελκυστικότερη και ασφαλέστερη επιλογή. Αυτή η μετάβαση ενισχύεται από μια έντονη δημόσια πίεση και ανάγκη πολιτικής δράσης, που προκλήθηκε και από τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών, την αυξανόμενη ατμοσφαιρική ρύπανση και την κρίση των υδάτινων πόρων, καθώς και με τις αυξανόμενες ανησυχίες για την κλιματική κρίση, που οδήγησε στη Συμφωνία του Παρισιού του 2015, η σημασία των οποίων αποκαλύπτεται στην πρόσφατη έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC).

Φαίνεται, λοιπόν, ότι οι τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ως φορέας για την απαλλαγή από τον άνθρακα των τομέων τελικής χρήσης, είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη αυτών των στόχων αλλά και για την αξιοποίηση των οικονομικών δυνατοτήτων που παρέχουν τα συστήματα αυτά. Ο τομέας της ενέργειας ηγείται της συνεχιζόμενης ενεργειακής μετάβασης, λόγω της ταχείας μείωσης του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ιδιαίτερα για την παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Μεταξύ 2010 και 2018 η τιμή των ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV) πλαισίων μειώθηκε κατά 90%, και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά φωτοβολταϊκά μειώθηκε κατά 77%, με περαιτέρω δραματικές μειώσεις που αναμένονται την επόμενη δεκαετία (Helacro, 2019).

Ωστόσο, αυτή η ενεργειακή μετάβαση χρειάζεται περαιτέρω επιτάχυνση αυτής της ανάπτυξης. Σύμφωνα με ανάλυση του IRENA (2018), η απαλλαγή του τομέα της ενέργειας από άνθρακα, σύμφωνα με τους κλιματικούς στόχους που περιγράφονται στη Συμφωνία του Παρισιού, θα απαιτούσε μερίδιο 85% της ανανεώσιμης ενέργειας στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2050. Μέχρι τότε η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων ηλιακή ενέργεια θα αυξηθεί από 900 GW που ήταν το 2017, σε 13000 GW και θα αντιπροσωπεύει το 60% της συνολικής παραγόμενης ισχύος. Αυτό απαιτεί διπλασιασμό των προσθηκών ηλιακής δυναμικότητας από τα επίπεδα του 2017. Επιπλέον, το μερίδιο της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη συνολική ενεργειακή ζήτηση των τριών βασικών

τομέων τελικής χρήσης – βιομηχανία, κτίρια και μεταφορές – πρέπει να διπλασιαστεί από περίπου 20% το 2015 σε 40% το 2050. Σε αυτή την κατεύθυνση, πολλές κυβερνήσεις κρατών έχουν υιοθετήσει πολιτικές, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στους πολίτες τους, να εφαρμόσουν και να χρησιμοποιήσουν συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με στόχο το οικονομικό όφελος στην τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας, με ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και η διασύνδεση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό θα εξεταστούν τα είδη και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των σταθμών αυτών, καθώς και η παρούσα κατάσταση στη χώρα μας. Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή της ενεργειακής κατάστασης και περιγράφονται οι πηγές ενέργειας και τα ενεργειακά αποθέματα, η εξοικονόμηση αλλά και η ορθολογική χρήση της ενέργειας και η του ενεργειακού σχεδιασμού. Αναλύεται επίσης, ο ρόλος των ΑΠΕ στα παραπάνω πεδία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φωτοβολταϊκά και αναλύεται η αρχή λειτουργίας, τα είδη και οι τεχνολογίες των συστημάτων αυτών, με έμφαση στη λειτουργία, την κατηγοριοποίηση και την απόδοση των συστημάτων αυτών. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, με έμφαση στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, η οποία περιλαμβάνει βασικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου, τα είδη των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και το θεσμικό πλαίσιο και η ισχύουσα νομοθεσία

Στο πέμπτο κεφάλαιο επιχειρείται μια καταγραφή της παρούσας κατάστασης των σταθμών ΑΠΕ και η μελέτη και σύγκριση των εγχώριων φωτοβολταϊκών πάρκων. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την προηγηθείσα ανάλυση και γίνονται προτάσεις περαιτέρω μελέτης του θέματος.

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

1.1. Πηγές ενέργειας και ενεργειακά αποθέματα

Στη Θερμοδυναμική ενέργεια ορίζεται η ικανότητα που έχει ένα σώμα για να παράγει έργο. Η ενέργεια μπορεί να προέρχεται από τις συμβατικές και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συμβατικές πηγές ενέργειας είναι οι φυσικοί πόροι από το υπέδαφος του πλανήτη οι οποίοι θεωρείται ότι κάποια στιγμή θα εξαντληθούν επειδή αναπληρώνονται με αρκετά αργό ρυθμό και παράλληλα έχουν δημιουργήσει μεγάλα προβλήματα και απειλούν το οικοσύστημα του ανθρώπου, εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και διοξειδίου του θείου (SO₂) και δημιουργούν βλαβερά απόβλητα. Οι συμβατικές πηγές ενέργειας που βρίσκουμε στη φύση είναι:

- Τα στερεά καύσιμα των γαιανθράκων (ο λιγνίτης, ο ανθρακίτης και η τύρφη) όπου η θερμότητα της καύσης τους χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και γενικά στην ηλεκτροπαραγωγή παγκοσμίως καθώς είναι μια φθηνή πηγή ενέργειας.
- Τα υγρά καύσιμα αποτέλεσμα κάποιας κατεργασίας όπως είναι το πετρέλαιο όπου μετά την άντλησή του υποβάλλεται σε καθαρισμό και κλασματική απόσταξη για να προκύψουν τα παράγωγά του τα οποία χρησιμοποιούνται στις μεταφορές, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και για θέρμανση.
- Τα αέρια καύσιμα όπως είναι το φυσικό αέριο, το οποίο είναι ορυκτό καύσιμο όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση και ψύξη των κτηρίων, στη βιομηχανία αλλά και για ηλεκτροπαραγωγή.
- Η πυρηνική ενέργεια αποτέλεσμα της διάσπασης ραδιενεργών υλικών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών.

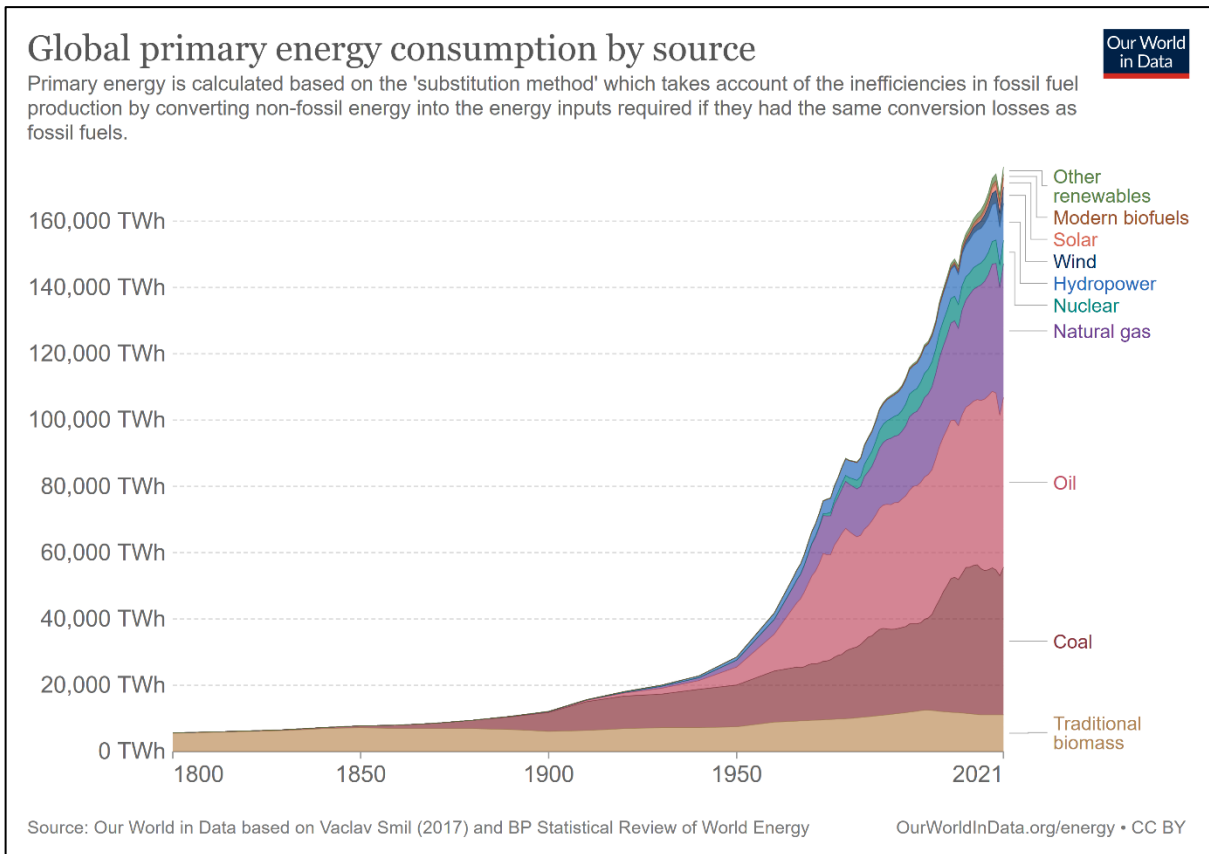
Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των μη ανανεώσιμων ή συμβατικών μορφών ενέργειας είναι ότι οι πηγές αυτού του είδους της ενέργειας εξαντλούνται σταδιακά ή δεν μπορεί να προσδιοριστεί η ακριβής ποσότητά τους (Παπαϊωάννου κ.α., 2010).

Από την άλλη πλευρά υπάρχουν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πηγές που συνδέονται με τον κύκλο της φύσης και τα αποθέματα τους είναι ανεξάντλητα. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε από τη φύση είναι:

1. Η ηλιακή ενέργεια (από τον ήλιο) της οποίας γίνεται άμεση εκμετάλλευσή της ενέργειας στα κτήρια μέσω ηλιακών συστημάτων θέρμανσης ή δροσισμού αλλά και η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
2. Η αιολική ενέργεια (από τον άνεμο) της οποίας γίνεται άμεση εκμετάλλευση της ενέργειας στα κτήρια για ηλεκτροπαραγωγή μέσω ανεμογεννητριών.
3. Η υδροηλεκτρική ενέργεια (από τις υδατοπτώσεις) της οποίας γίνεται άμεση εκμετάλλευσή της ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Η κυματική ενέργεια (από τα κύματα) της οποίας γίνεται άμεση εκμετάλλευσή της ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
5. Η ενέργεια από τη βιομάζα, η οποία αξιοποιείται στα κτήρια σε εστίες καύσης και κυρίως για θέρμανση των χώρων και για χρήση ζεστού νερού.
6. Η γεωθερμική ενέργεια (από το εσωτερικό της γης) της οποίας γίνεται άμεση εκμετάλλευσή της ενέργειας στα κτήρια για τη θέρμανση και ψύξη των εσωτερικών χώρων αλλά και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Σήμερα, όταν σκεφτόμαστε τα ενεργειακά μείγματα, σκεφτόμαστε μια ποικιλία πηγών - άνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, πυρηνική ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, βιοκαύσιμα. Αλλά αν κοιτάξουμε πίσω μερικούς αιώνες πριν, ενεργειακό μας μίγμα ήταν είναι σχετικά ομοιογενής και η μετάβαση από τη μια πηγή στην άλλη ήταν απίστευτα αργή. Στο **Σχήμα 1-1** απεικονίζεται η παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας που χρονολογείται από το έτος 1800.

Παρατηρούμε ότι μέχρι τα μέσα του 19ου αιώνα, η παραδοσιακή βιομάζα – η καύση στερεών καυσίμων όπως το ξύλο, τα απόβλητα των καλλιεργειών ή ο ξυλάνθρακας – ήταν η κυρίαρχη πηγή ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε σε όλο τον κόσμο. Αλλά με τη Βιομηχανική Επανάσταση ήρθε η άνοδος του άνθρακα ακολουθούμενο από πετρέλαιο, φυσικό αέριο και στις αρχές του 20ου αιώνα, η υδροηλεκτρική ενέργεια. Μόλις τη δεκαετία του 1960 προστέθηκε η πυρηνική ενέργεια στο μείγμα. Αυτά που συχνά αναφέρονται ως «σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας» – ηλιακή και αιολική – προστέθηκαν πολύ αργότερα, τη δεκαετία του 1980. Αυτό που ο Smil (2017) τονίζει στην έρευνα του είναι ο αργός ρυθμός με



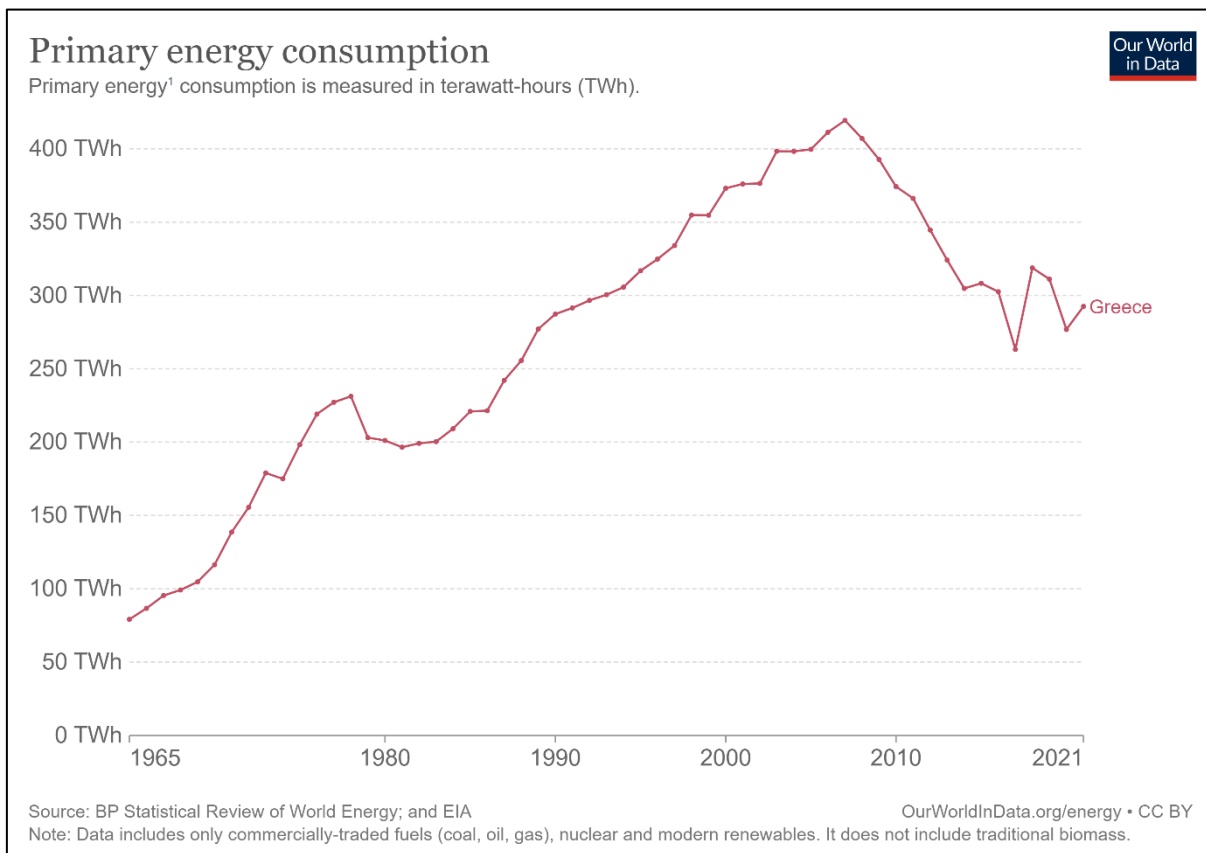
Σχήμα 1-1: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά πηγή την περίοδο 1800-2021 (πηγή: ourworldindata)

τον οποίο έχουν συμβεί οι ενεργειακές μεταβάσεις στο παρελθόν. Η ταχύτητα και η κλίμακα της ενεργειακής μετάβασης που χρειαζόμαστε σήμερα για τη μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα στην ενέργεια με χαμηλές εκπομπές άνθρακα είναι επομένως μια νέα πρόκληση, πολύ διαφορετική από το παρελθόν.

1.1.1. Παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

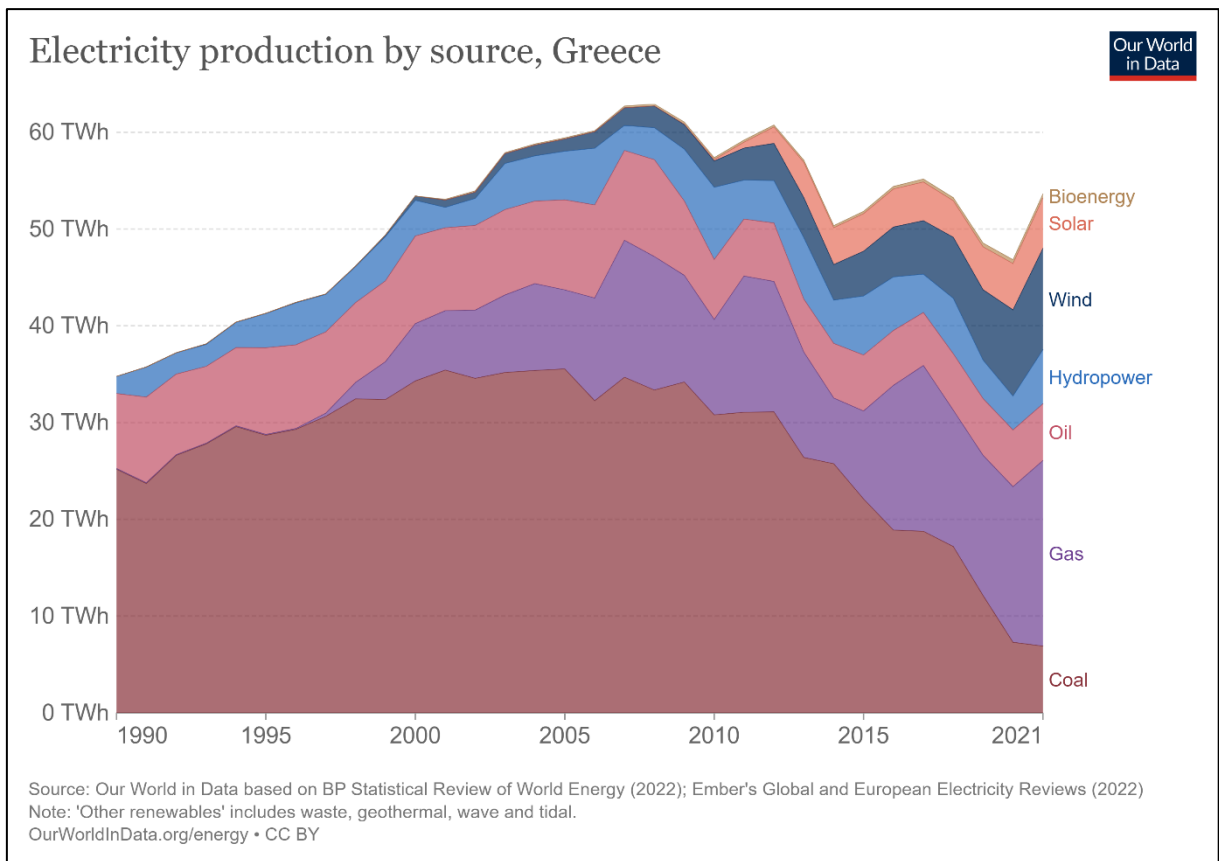
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στην Ελλάδα παρουσίασε σημαντική αύξηση, συνέπεια της αύξησης του βιοτικού επιπέδου. Στο **Σχήμα 1-2** παρουσιάζεται η εξέλιξη αυτή για το διάστημα 1965-2021. Ειδικότερα, η διαχρονική εξέλιξη ήταν σταθερά αυξητική, με εξαίρεση τις ενεργειακές κρίσεις της δεκαετίας του 1970 και την οικονομική ύφεση κατά την περίοδο 2009-2015. Τα τελευταία χρόνια με τη βελτίωση της οικονομίας, παρατηρείται μια αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας αν και μικρότερη σε σχέση με αυτή των περασμένων ετών, κάτι το οποίο μοιάζει λογικό αν λάβουμε

υπόψη την υιοθέτηση πολιτικών για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας σε όλους του τομείς.



Σχήμα 1-2: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας την περίοδο 1965-2021 (πηγή: ourworldindata)

Καθώς οι χώρες προσπαθούν να στραφούν από τα ορυκτά καύσιμα προς πηγές ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα (πυρηνικές ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της υδροηλεκτρικής ενέργειας, της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας), το μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας (electricity mix) γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό. Στο **Σχήμα 1-3**, παρουσιάζεται το εγχώριο ηλεκτρικό μείγμα ανά πηγή. Παρατηρούμε ότι ο λιγνίτης κατέχει ένα σημαντικό μερίδιο στην ηλεκτροπαραγωγή, ακολουθούμενος από το -εισαγόμενο- φυσικό αέριο και τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας. Σε επίπεδο συμβατικών καυσίμων, το πετρέλαιο συμμετέχει στην ηλεκτροπαραγωγή των μη διασυνδεδεμένων νησιών της χώρας. Με μια προσεκτική ματιά στο ηλεκτρικό μίγμα, φαίνεται ότι ο λιγνίτης συνεχίζει να αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας στην χώρα, η οποία όμως περιορίζεται σταδιακά, με μεγαλύτερο ρυθμό τα τελευταία χρόνια. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, το μερίδιο του λιγνίτη στην παραγωγή ηλεκτρικής περιορίστηκε, σχεδόν, στο ήμισυ κατά το διάστημα 2001-2017.



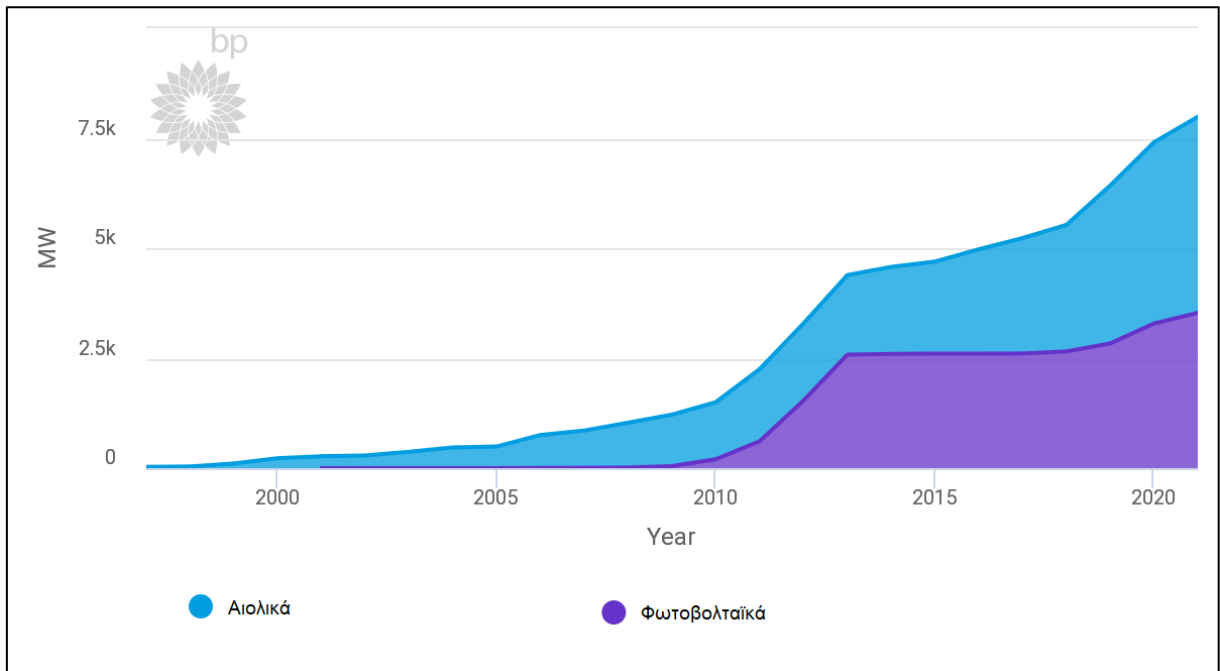
Σχήμα 1-3: Εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή την περίοδο 1990-2021 (πηγή: ourworldindata)

Η παρουσία του, εισαγόμενου, φυσικού αερίου στο ενεργειακό μίγμα της χώρας αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία, γεγονός που την αναδεικνύει ως τη δεύτερη σημαντικότερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Από την άλλη, οι ΑΠΕ σημείωσαν ανοδική πορεία κατά τα τελευταία 20 έτη στην χώρα. Τα αιολικά είχαν τη μεγαλύτερη συμμετοχή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2017, αντιπροσωπεύοντας το 10% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας (Καλδέλλης κ.α., 2021α). Όσον αφορά στα φωτοβολταϊκά, η επίδρασή τους στη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση του ΕΣΜΗΕ ήταν καθοριστική, παρουσιάζοντας κατακόρυφη άνοδο το διάστημα 2010-2013, με την αντίστοιχη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να είναι περίπου 23 φορές υψηλότερα στο τέλος της περιόδου, συγκριτικά με την αρχή. Τέλος, τα υδροηλεκτρικά συστήματα αποτελούν μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με σταθερή συμμετοχή, διαχρονικά, στο εγχώριο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Αγγελόπουλος, 2019).

1.1.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ

Όσον αφορά στον τομέα των ΑΠΕ, η παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα αποτελεί την βασικότερη πηγή «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα με σταθερά ανοδική πορεία τα

τελευταία 25 χρόνια. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) στην Ελλάδα σημείωσε μια κατακόρυφη αύξηση κατά την χρονική περίοδο 2010-2013, η οποία βασίστηκε στην σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από Φ/Β, που ενισχύθηκε από τα οικονομικά κίνητρα που δόθηκαν εκείνη την χρονική περίοδο (Σχήμα 1-4).



Σχήμα 1-4: Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς αιολικών και φωτοβολταϊκών συστημάτων την περίοδο 1996-2021 (πηγή: BP statistics)

Από το παραπάνω διάγραμμα επίσης προκύπτει ότι τα φωτοβολταϊκά, από την σχεδόν μηδενική συνεισφορά τους πριν το 2010 στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα, κατάφεραν μέσα σε μια τετραετία να αντιπροσωπεύουν περίπου το 35% της συνολικής ισχύος. Ωστόσο, η αυξητική αυτή πορεία διακόπηκε τα επόμενα χρόνια, κυρίως λόγω των πολιτικών που εφαρμόστηκαν στο διάστημα αυτό (Νόμος 4254/2014) αλλά και του γεγονότος ότι η αυτή η μικρής διάρκειας αλλά ραγδαία αύξηση οδήγησε σε μακροπρόθεσμη σημαντική επιβάρυνση των λογαριασμών ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών λόγω του αυξημένου ειδικού τέλους των ΑΠΕ, με την παραγωγή από αιολικά, από την άλλη πλευρά, να συνεχίζει την σταθερά αυξητική της πορεία (Αγγελόπουλος, 2019).

1.2. Εξοικονόμηση και ορθολογική χρήση της ενέργειας

Με τον όρο εξοικονόμηση ενέργειας νοείται η μείωση της ποσότητας ενέργειας που χρησιμοποιείται. Όσο λιγότερη ενέργεια χρησιμοποιείται τόσο θα αυξάνονται τα οφέλη τόσο στο οικονομικό κεφάλαιο, αλλά το σημαντικότερο στον περιβαλλοντικό τομέα. Η παραγωγή ενέργειας απαιτεί την αξιοποίηση πολύτιμων φυσικών πόρων όπως είναι ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Οπότε χρησιμοποιώντας λιγότερη ενέργεια αποθηκεύονται αυτοί οι πόροι για μελλοντική χρήση. Η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε με ραγδαίους ρυθμούς λόγω της αύξησης των αναγκών για καλύτερες συνθήκες αλλά και των λανθασμένων πρακτικών του παρελθόντος πάνω στην κατασκευή των κτηρίων (κακό προσανατολισμό, έλλειψη σωστής μόνωσης και σκιάστρων) καθιστώντας την Ε.Ε. να λάβει δραστικά μέτρα για την αποφυγή περαιτέρω προβλημάτων που τυχόν να επηρεάσουν την ισορροπία του περιβάλλοντος.

Αναλυτικότερα, η Ε.Ε. δεσμεύεται για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον 40% έως το 2030, σε σύγκριση με το 1990, για τουλάχιστον 27% κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ, για βελτίωση κατά 27% τουλάχιστον της ενεργειακής απόδοσης καθώς και για τη στήριξη ολοκλήρωσης της εσωτερικής αγοράς ενέργειας της ηλεκτρικής διασύνδεσης σε ποσοστό 10% το 2020 και επειγόντως στις χώρες της Βαλτικής και την Ιβηρική χερσόνησο, και με ποσοστό 15% έως το 2030. Με την παραγωγή ενέργειας από τα συμβατικά καύσιμα, επέρχεται η ρύπανση του περιβάλλοντος, με τη ρύπανση της ατμόσφαιρας να επιβαρύνεται περισσότερο. Φαίνεται ότι η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι αναπόφευκτη έως ένα βαθμό, μπορεί όμως να περιοριστεί και έτσι να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις της (Δασκαλάκη, 2020).

Οι προβλέψεις και οι εκτιμήσεις που υπάρχουν τονίζουν την αναγκαιότητα μεταβολής των πολιτικών της ΕΕ προκειμένου να επιτύχει τις επιδιώξεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ως μακροπρόθεσμη στοχοθέτηση για το 2050 υπάρχει η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο 80%-95% συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990 σε όλο το φάσμα των τομέων, δηλαδή στη βιομηχανία, τις μεταφορές, τα κτήρια, τις κατασκευές και τη γεωργία (EC-Climate Action, 2015).

Οι στόχοι της ορθολογικής χρήσης της ενέργειας διαφοροποιούνται από τους στόχους της διαχείρισης της ενέργειας και της εξοικονόμησης ενέργειας. Η διαχείριση ενέργειας εστιάζεται στη μείωση των ενεργειακών δαπανών, η εξοικονόμηση ενέργειας στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ενώ η ορθολογική χρήση της ενέργειας τόσο στη μείωση της

κατανάλωσης (ενεργειακή αποδοτικότητα) όσο και στην κατάλληλη χρήση της ενέργειας συνεκτιμώντας την ποιότητά της σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις της χρήσης της.

Ο όρος ορθολογική χρήση της ενέργειας χρησιμοποιήθηκε στη χώρα μας πολύ στις δεκαετίες που ακολούθησαν τις πετρελαϊκές κρίσεις Ένας από τους βασικούς λόγους είναι ότι στο μεταξύ μαζί με το ενεργειακό πρόβλημα αναδείχθηκε το επίσης σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα από τη χρήση της ενέργειας, και ο νέος δείκτης που εισάχθηκε -ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO_{2e}- μπορεί κατάλληλα να οδηγεί σε σχεδιασμό ορθολογικής χρήσης της ενέργειας με δεδομένες τις σημαντικές καταναλώσεις συμβατικών καυσίμων για την ηλεκτροπαραγωγή (Κορωνάιος, 2012).

Η διαρκώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας αλλά και η επιδείνωση του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία και η επίλυση τους έχει γίνει επιτακτική ανάγκη σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι προσπάθειες συγκλίνουν στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα από συμβατικά καύσιμα, με άμεση συνέπεια τον περιορισμό των ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα και κυρίως των αερίων που συμβάλλουν στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η ορθολογική χρήση ενέργειας μας δίνει τη δυνατότητα να εξοικονομήσουμε ενέργεια σε όλους τους τομείς, χωρίς να μειώσουμε, κατ' ανάγκη, τα επίπεδα διαβίωσης μας. Εκμεταλλευόμενοι νέα συστήματα, τεχνολογίες και υλικά και κυρίως τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (όπως τον ήλιο, τον αέρα, την γεωθερμία και την βιομάζα), μπορούμε να πετύχουμε και τους δύο στόχους, δηλαδή μείωση της κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων και προστασία του περιβάλλοντος. Παράλληλα όμως η παραγωγή ενέργειας για φωτισμό εξαρτάται περισσότερο από τη χρήση των χρηστών παρά από την ενεργειακή απόδοση. Η εισαγωγή ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να αναιρέσει αυτήν την δυνατότητα, και έτσι οι σύγχρονες τάσεις στο σχεδιασμό των ενεργειακών συστημάτων να στηρίζονται σε ενεργο-οικονομικές αναλύσεις, συνεκτιμώντας βέβαια τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους.

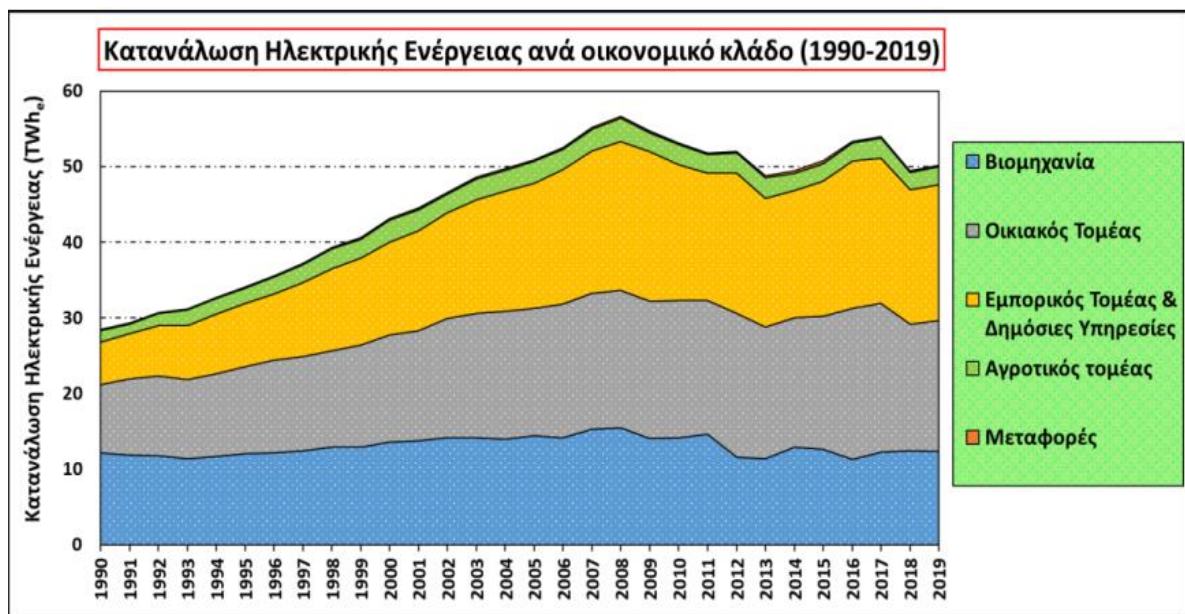
Η προσπάθεια αυτή έχει ήδη ξεκινήσει και μας αφορά όλους γιατί έχουμε σημαντικά οφέλη σε κάθε επίπεδο, οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό και μπορούμε έτσι να συμβάλλουμε στην επίτευξη αυτών των στόχων. Τα κέρδη από την ορθολογική χρήση ενέργειας στα κτήρια είναι πολλαπλά και περιλαμβάνουν (Κερούλης, 2014):

- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για τη θέρμανση, τον δροσισμό, τον φωτισμό και τις οικιακές συσκευές.
- Βελτίωση των εσωτερικών συνθηκών άνεσης, όλο το χρόνο.

- Εξοικονόμηση χρημάτων.
- Ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση εθνικών ενεργειακών πόρων.
- Μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

1.3. Η σημασία του ενεργειακού σχεδιασμού

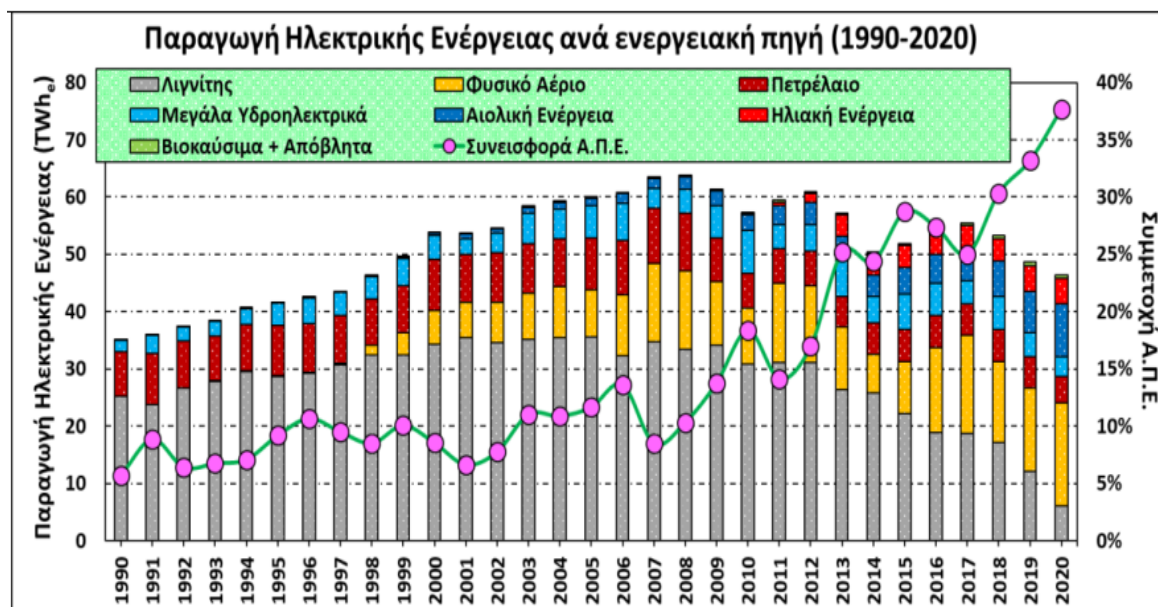
Η εγχώρια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθεί αυξητική τάση σε όλους τους παραγωγικούς τομείς. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 1-5** παρουσιάζεται η μεταβολή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά οικονομικό κλάδο της χώρας μας τα τελευταία 30 χρόνια, με τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να κυμαίνεται εδώ και αρκετά χρόνια στα επίπεδα των 50-52 TWh. Από το συγκεκριμένο σχήμα γίνεται ιδιαίτερα εμφανής η αύξηση των ενεργειακών αναγκών που αντιστοιχούν στον οικιακό και τον εμπορικό τομέα καθώς και στον τομέα των δημοσίων υπηρεσιών στο υπό εξέταση χρονικό διάστημα. Από την άλλη πλευρά, τόσο η βιομηχανία όσο και ο αγροτικός τομέας καθώς και ο τομέας των μεταφορών παρουσιάζουν σχεδόν σταθερή ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε βάθος 30ετίας (Καλδέλλης κ.α., 2021β).



Σχήμα 1-5: Διαχρονική μεταβολή εγχώριας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά τομέα (πηγή: Καλδέλλης κ.α., 2021β)

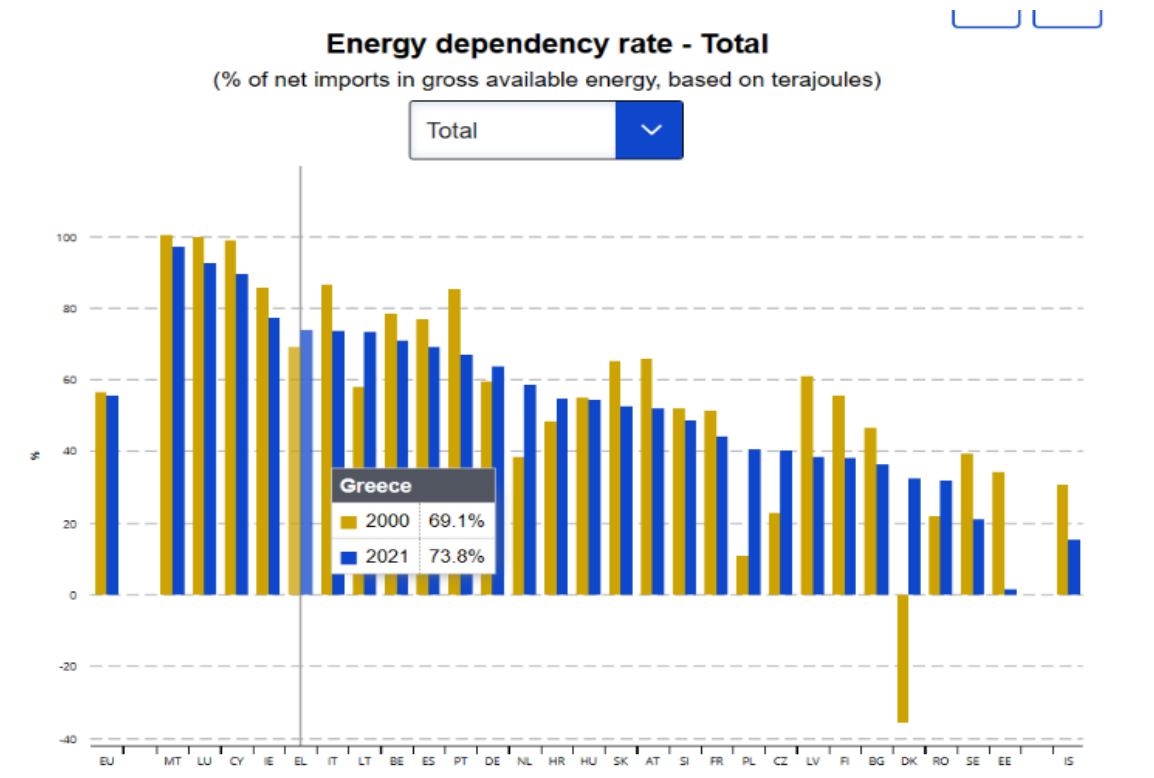
Από την άλλη, η διαχρονική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά ενεργειακή πηγή στη χώρα μας αποτυπώνεται στο **Σχήμα 1-6**. Στο γράφημα καθίσταται εμφανής η σταδιακή μείωση της

ηλεκτροπαραγωγής τόσο των λιγνιτικών όσο και των πετρελαϊκών σταθμών, καθώς και η παράλληλη αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής των σταθμών φυσικού αερίου. Από την άλλη πλευρά, η συμμετοχή των ΑΠΕ (μεγάλοι και μικροί υδροηλεκτρικοί, αιολικοί, φωτοβολταϊκοί και σταθμοί βιομάζας) παρουσιάζει διαρκή αύξηση, με τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην εγχώρια ηλεκτροπαραγωγή για το 2020 να προσεγγίζει το 38% (Καλδέλλης κ.α., 2021β).



Σχήμα 1-6: Διαχρονική μεταβολή εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή (πηγή: Καλδέλλης κ.α., 2021β)

Εξετάζοντας προσεκτικά τη διάρθρωση του εγχώριου ενεργειακού μίγματος του Σχήματος 1-3, είναι προφανές ότι οι ενεργειακές ανάγκες της χώρας μας καλύπτονται κατά κύριο λόγο από εισαγωγές πετρελαίου και φυσικού αερίου, ενώ παράλληλα η συμμετοχή των ΑΠΕ (συμπεριλαμβανομένων των υδροηλεκτρικών σταθμών -μικρών και μεγάλων-) δεν έχει παρουσιάσει την αναμενόμενη αύξηση. Η πληροφορία αυτή αποτυπώνεται ποσοτικά στο Σχήμα 1-7, όπου παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή της ενεργειακής αυτονομίας της χώρας μας τα τελευταία 30 χρόνια. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, η ενεργειακή αυτάρκεια της χώρας μας παρέμεινε χαμηλή στα επίπεδα του 35% μέχρι και το 2014, ενώ στη συνέχεια μειώθηκε ακόμα περισσότερο, ώστε το 2021 το 73,8% της ενέργειας που κατανάλωσε η χώρα μας να προέρχεται από το εξωτερικό, με αναπόφευκτες οικονομικές, κοινωνικές και πολιτικές συνέπειες.



Σχήμα 1-7: Ενεργειακή αυτονομία της Ελλάδας (πηγή: <https://ec.europa.eu/eurostat/>)

Είναι, λοιπόν, εμφανές ότι για να αντισταθμιστεί το θέμα της έλλειψης της ενέργειας, αλλά και γενικότερα ενεργειακά ζητήματα θα πρέπει να λάβει χώρα συστηματικός και ολοκληρωμένος ενεργειακός σχεδιασμός. Ειδικότερα, ο ενεργειακός σχεδιασμός πρέπει να παρουσιάζει σειρά επάλληλων επιπέδων. Θα πρέπει το κατώτερο επίπεδο πρέπει να είναι συμβατό με το ανώτερο του. Σε οποιοδήποτε επίπεδο διαρραγεί ο σχεδιασμός αυτός θα υπάρξουν προβλήματα όσον αφορά το είδος την ποσότητα και την πηγή της ενέργειας βάσει των χωρικό παράγοντα.

Στο ανώτατο επίπεδο του ενεργειακού σχεδιασμού, είναι τι είδους ενέργεια θα παραχθεί, σε τι ποσότητα και ποιότητα και ποια θα είναι η κατανομή ανάμεσα σε συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης πως θα είναι η κατανομή κυρίως χωρική της ενέργειας που προέρχεται από συμβατικές πηγές στις διάφορες μορφές της και το ίδιο θα γίνει και για τις ανανεώσιμες επίσης σε όλες της μορφές της. Προέχοντα λόγο θα έχει η βιώσιμη ανάπτυξη και ως προς τις δύο διαστάσεις δηλαδή της εξοικονόμησης των φυσικών πόρων και της ικανοποιητικής προστασίας του περιβάλλοντος.

Σε ένα κατώτερο επίπεδο θα κατανεμηθεί η ενέργεια με βάσει το χωρικό σχεδιασμό. Σύμφωνα με το Σύνταγμα ένας τέτοιος σχεδιασμός είναι επιβεβλημένος. Ας σημειωθεί ότι το άρθρο 24 του Συντάγματος αναφέρεται στην προστασία του φυσικού, του πολιτιστικού καθώς και του

ανθρωπογενούς (οικιστικού) περιβάλλοντος. Σε όλα αυτά τα σχέδια και προγράμματα πρέπει να ενσωματωθεί και ο ενεργειακός σχεδιασμός. Δηλαδή η ενεργειακή συνιστώσα πρέπει να αποτελέσει καθοριστικό στοιχείο στον υπόψη χωρικό σχεδιασμό.

Με την ενσωμάτωση της ενεργειακής συνιστώσας που πρέπει να λάβει χώρα σύμφωνα με τα προαναφερθέντα και να περιλαμβάνει όλο το εύρος του ενεργειακού σχεδιασμού, όπως προδιαγράφηκε, μεταξύ άλλων σε μια χωρική περιοχή πρέπει να περιγραφεί το σύνολο της ενέργειας που θα απαιτηθεί, η κατανομή αυτής σε συμβατικές και ανανεώσιμες μορφές και η επί μέρους κατανομή στα χωρικά υποσύνολα τόσο των συμβατικών όσο και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και όλα αυτά πάντα με βάση τις κατευθύνσεις της βιώσιμης ανάπτυξης δηλαδή την εξοικονόμηση φυσικών πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος (Stavrakakis et al, 2012).

1.4. Ο ρόλος των ΑΠΕ

Η ανάγκη για οικονομικότερες μορφές ενέργειας, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων μειώνονται, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη στροφής προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αναφέρονται και ως ήπιες μορφές ενέργειας ή εναλλακτικές πηγές ενέργειας ή καθαρές πηγές ενέργειας, όροι που παραπέμπουν σε εκμεταλλεύσιμες πηγές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διεργασίες. Ο όρος «ανανεώσιμες» αναφέρεται στο γεγονός ότι οι πηγές αυτές ενέργειας υπάρχουν άφθονες στο φυσικό περιβάλλον και τα αποθέματά τους ανανεώνονται συνεχώς. Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται στο γεγονός ότι για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση (εξόρυξη, άντληση ή καύση), αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Ο όρος «καθαρές» αναφέρεται στη φιλικότητα τους προς το περιβάλλον, καθώς δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες συμβατικές πηγές ενέργειας (ορυκτά καύσιμα). Τέλος, ο όρος «εναλλακτικές» επισημαίνει τη διαφορά τους από τις μέχρι σήμερα ευρέως συμβατικές πηγές ενέργειας (Παπαδάτος, 2014)

Η αξιοποίησή τους για την παραγωγή ενέργειας έχει να προσφέρει μόνο θετικά, όπως:

- *Μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς ενεργειακούς πόρους, καθώς δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι αυτοί δεν είναι ανεξάντλητοι. Ταυτόχρονα, η στροφή προς τους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους διασφαλίζει μία σταθερότητα στο οικονομικό*

σύστημα λόγω του χαμηλού λειτουργικού κόστους, αλλά και της μη εξάρτησης από τις διακυμάνσεις των τιμών των συμβατικών καυσίμων.

- *Προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.* Με την εξάπλωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη συμβατική ενεργειακή αλυσίδα, καθώς μειώνονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, που είναι η κύρια αιτία της αλλαγής του κλίματος. Επιπλέον, η υποκατάσταση των σταθμών παραγωγής ενέργειας από συμβατικές πηγές οδηγεί σε ελάττωση εκπομπών από άλλους ρυπαντές π.χ. οξείδια θείου και αζώτου, που προκαλούν την όξινη βροχή.
- *Εκτόνωση πολιτικών εντάσεων.* Οι περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες εξαρτώνται σήμερα από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Οι ΑΠΕ είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο, το οποίο ως άμεση συνέπεια θα έχει την εκτόνωση, στην παγκόσμια αγορά, εντάσεων οι οποίες συχνά οδηγούν σε πολιτική και οικονομική ανασφάλεια των χωρών.
- Οι ΑΠΕ είναι *διάσπαρτες γεωγραφικά* και οδηγούν στην *αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος*, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας. Παράλληλα προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν σημαντική δυναμική ως προς τη *δημιουργία και διαφύλαξη θέσεων εργασίας*. Μελέτη του WWF για τη βιομάζα εντοπίζει ένα δυναμικό απασχόλησης της τάξεως των 170.000-290.000 θέσεων εργασίας πλήρους απασχόλησης στις χώρες του ΟΟΣΑ μόνο και μόνο από αυτή τη συγκεκριμένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Οι εν λόγω θέσεις εργασίας υπολογίζεται ότι θα δημιουργηθούν κυρίως σε αγροτικές, αδύναμες από πλευράς υποδομών, περιοχές και θα είναι ως εκ τούτου εξαιρετικά σημαντικές. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή επίσης προβλέπει ότι η σταθερή προμήθεια ανανεώσιμης ενέργειας θα έχει θετικές επιπτώσεις στην απασχόληση (Αναγνώστου & Αυγουστάκη, 2012).

Οφέλη και πλεονεκτήματα των ΑΠΕ

Τα οφέλη που προκύπτουν από την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δεν είναι μόνο οικονομικής φύσεως αλλά η αξιοποίηση αυτών των ενεργειακών πόρων μπορεί να επιφέρει σημαντικές θετικές περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές συνεισφορές στην περιφερειακή και την τοπική ανάπτυξη της χώρας. Σίγουρα απαιτείται ένα σημαντικό κεφάλαιο για την αρχική τους εγκατάσταση και τον εξοπλισμό τους, όμως το κόστος τείνει να είναι αμελητέο σε σχέση με τα αποτελέσματα τους που είναι πολύ σημαντικά. Τα κύρια πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα εξής (Κερούλης, 2014):

1. Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.
2. Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
3. Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
4. Είναι ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επιτόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
5. Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.
6. Αύξηση της ανταγωνιστικότητας, μετά την πλήρη απελευθέρωση αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
7. Αύξηση θέσεων εργασίας σε όλα τα στάδια κατασκευής, μεταφοράς, εγκατάστασης, συντήρησης, φύλαξης των ανεμογεννητριών στα αιολικά και ηλιακά πάρκα.
8. Αύξηση εισοδήματος αναπτυσσόμενων περιφερειών από την εισροή κεφαλαίων επενδυτών και επιδότησης από Ε.Ε.
9. Αισθητική εναρμόνιση σε περιβάλλοντες χώρους μικρής κλίμακας ειδικά σε αποψιλωμένα βουνά.
10. Συμβολή στην μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και επίτευξη του στόχου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. μέχρι το 2030 στο 32%.
11. Εξοικονόμησης ενέργειας π.χ. με τη θέρμανση νερού με ηλιακούς θερμοσίφωνες.
12. Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.

Τα τελευταία χρόνια η χρήση ΑΠΕ στην Ελλάδα έχει αυξηθεί σημαντικά και αυτό οφείλεται κυρίως στη σταδιακή εναρμόνιση της ελληνικής νομοθεσίας με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στην Ελλάδα, η ΔΕΗ μέχρι το 1994 είχε μονοπώλιο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ περίπου 70 MW. Την ίδια χρονιά, με το Νόμο 2292/1994, ιδιώτες επενδυτές απέκτησαν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και πώλησής της με ευνοϊκούς όρους τιμολόγησης. Η ουσιαστική απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας έγινε το 1999 με το Νόμο 2773/1999 και την ταυτόχρονη ίδρυση της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) και του Διαχειριστή του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ). Η ΡΑΕ είναι ανεξάρτητος φορέας που γνωμοδοτεί στο Υπουργείο Ανάπτυξης για ενεργειακά θέματα (άδειες παραγωγής, τιμολόγηση κ.λπ.), ενώ η ΔΕΣΜΗΕ αντικαταστάθηκε σήμερα με το Νόμο 4001/2011 από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) και την Ελληνική Ηλεκτρική ενέργεια. Διαχειριστής Αγοράς (ΛΑΓΗΕ) (Χαχίρι, 2020).

Το 2001, σύμφωνα με την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2001/77/ΕΚ, η Ελλάδα όρισε μερίδιο 20,1% των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας έως το 2010, ποσοστό που αντιστοιχεί σε περίπου 3 GW εγκατεστημένης ισχύος. Ωστόσο, στα τέλη του 2010 η εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα ήταν ίση με περίπου 1,7 GW, ποσό που απείχε σημαντικά από τους στόχους του 2010. Αυτό προκάλεσε ανησυχίες και η λύση ήρθε με το Νόμο 3468/2006, με τον οποίο γίνεται εναρμόνιση με την τάση της ΕΕ, αντικατάσταση συμβατικών πηγών ενέργειας μέσω επιδοτήσεων για όλες τις ΑΠΕ και δημιουργούνται ισχυρά επενδυτικά κίνητρα και οι διαδικασίες αδειοδότησης απλοποιούνται (Δούκας, 2018).

Στα τέλη του 2019 οριστικοποιήθηκε το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), στο οποίο προβλέπεται συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε τουλάχιστον 35% μέχρι το 2030, με το σημερινό μερίδιο των ΑΠΕ να ανέρχεται στο 18% (ΥΠΕΝ, 2019). Ειδικότερα, για τα σχήματα ενεργειακού συμψηφισμού αναφέρεται ότι η συνεισφορά των σχημάτων ενεργειακού συμψηφισμού θα συμβάλλει στην υλοποίηση επενδύσεων τεχνολογίας ΑΠΕ και εξοικονόμησης ενέργειας. Στόχος είναι να αναπτυχθούν και καινοτόμα προγράμματα ενεργειακού συμψηφισμού, τόσο στο σκέλος της παραγωγής όσο και της κατανάλωσης ενέργειας υποστηρίζοντας έτσι την αποκεντρωμένη παραγωγή και διαχείριση ενέργειας. Ποσοτικός στόχος είναι η εγκατάσταση και λειτουργία νέων συστημάτων αυτοπαραγωγής και ενεργειακού συμψηφισμού, κυρίως για κάλυψη ιδίων αναγκών άνω των 600 MW μέχρι το έτος 2030, ώστε συνολικά να ανέλθουν σε πάνω από 1 GW εγκατεστημένης ισχύος (ΥΠΕΝ, 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται βασικές έννοιες γύρω από τα φωτοβολταϊκά συστήματα, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια και προκειμένου να περιγραφούν τα δομικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

2.1 Αρχή λειτουργίας

Η ηλιακή ενέργεια αναφέρεται σε κάθε μορφή ενέργειας η οποία παράγεται από την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια, μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων και μέσω ηλιοθερμικών συστημάτων αντίστοιχα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική μέσα από τη λειτουργία φωτοβολταϊκών πάνελ και αντιστροφέων, όπου παράγεται αρχικά DC ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε AC ενέργεια, έτοιμη προς κατανάλωση ή προς έγχυση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

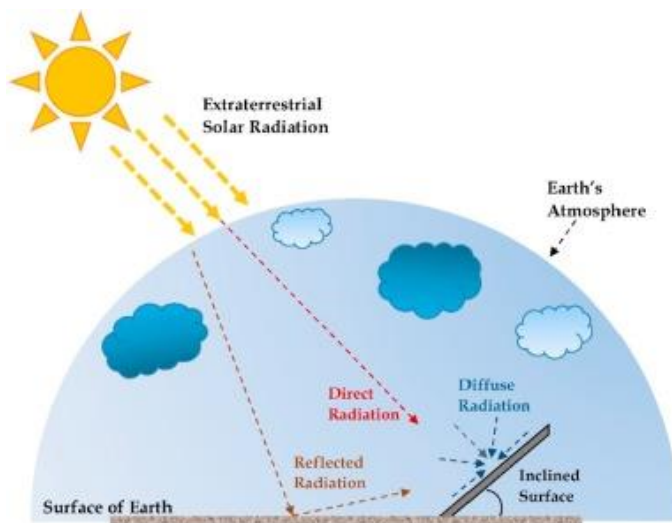
Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούνται από ηλιακές κυψέλες, οι οποίες κατασκευάζονται από ημιαγωγούς. Οι ημιαγωγοί συνδυάζονται έτσι ώστε να δημιουργούνται επαφές p και n, οι οποίες γειτνιάζουν μέσα σε κάθε ηλιακή κυψέλη. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο αναλύεται περαιτέρω παρακάτω. Χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στις ηλιακές κυψέλες ως αποτέλεσμα των ηλεκτρονίων που κινούνται από την n-περιοχή στην p-περιοχή της ηλιακής κυψέλης. Τα πιο σημαντικά ορόσημα στην εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου περιλαμβάνουν την πρώτη περιγραφή του φαινομένου από τον Wurfel το 1982 τη θεωρία του Einstein για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο το 1905 και την κατασκευή της πρότυπης εξίσωσης για την περιγραφή της λειτουργίας της φωτοβολταϊκής κυψέλης από τους Mott και Schottky. Σημειώνεται ότι υπάρχει θεαματική εξέλιξη σε ό,τι αφορά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών, με την απόδοσή τους η οποία ξεκίνησε με τιμές κοντά στο 6% να έχει φτάσει σήμερα να ξεπερνά το 25% (Green, 2009; Righini & Enrichi, 2020).

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο, η οποία φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται, ενώ ένα άλλο μέρος αντανάκλαται πίσω στην ατμόσφαιρα. Πράσινη ή ανανεώσιμη ενέργεια μπορεί να παραχθεί μέσα από την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, με την απόδοση της αξιοποίησής της να εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, από τη γωνία πρόσπτωσης και από τις κλιματικές συνθήκες (νέφωση και θερμοκρασία).

Ανάλογα με το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας (λ) ορίζονται διάφορες φασματικές περιοχές του φωτός. Το μήκος κύματος ορατής ακτινοβολίας κυμαίνεται ανάμεσα στα 400nm και στα 780nm, ενώ το μήκος κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας κυμαίνεται ανάμεσα στα 780nm και στα 3000nm, αντιπροσωπεύοντας περί το 95% της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης. Η ηλιακή ακτινοβολία φθίνει όσο πλησιάζει στην επιφάνεια της γης, ενώ περίπου το ένα τρίτο της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης αντανακλάται πίσω στο διάστημα (Şen, 2004).

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία η οποία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα απορροφάται και αντανακλάται μερικώς, η υπολειπόμενη ηλιακή ακτινοβολία η οποία φτάνει στην επιφάνεια της γης συνίσταται σε δύο επιμέρους συνιστώσες:

- άμεση ηλιακή ακτινοβολία, η οποία εξαρτάται από με τη γωνία πρόσπτωσης
- διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προκύπτει από την άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία η οποία σκεδάζεται και αντανακλάται στον αέρα, και η οποία εξαρτάται από τη θέση του ήλιου, την ατμοσφαιρική υγρασία και τους δείκτες ανάκλασης των κτηρίων και άλλων κατασκευών στο έδαφος

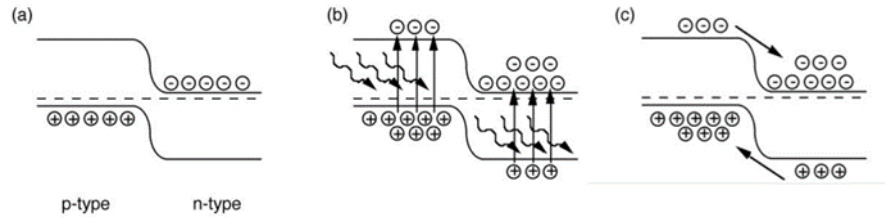


Εικόνα 1: Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας (Jamil & Bellos, 2019)

Ως εκ τούτου, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει απουσία νέφωσης, ενώ η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει παρουσία νέφωσης. Δεδομένης της ύπαρξης πυκνών κατασκευών στις αστικές περιοχές, η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι περισσότερη από ό,τι σε αγροτικές περιοχές.

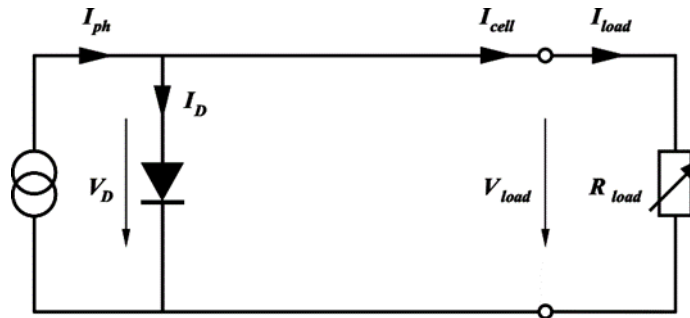
Παρακάτω, (**Εικόνα 2**) αναπαρίσταται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο γραφικά. Στην κατάσταση a η επαφή βρίσκεται σε ισορροπία. Στην κατάσταση b μετακινούνται

ηλεκτρόνια προς την περιοχή p καταλαμβάνοντας τις θέσεις των οπών, ενώ στην κατάσταση c η επαφή επανέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας.



Εικόνα 2: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Brus, 1984)

Η κίνηση αυτή οδηγεί στη δημιουργία ενός φωτορεύματος (I_{ph}). Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας ιδανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης αποτελείται από μία δίοδο p-n, και μία πηγή φωτορεύματος, αντιπροσωπεύοντας την ηλιακή ακτινοβολία.

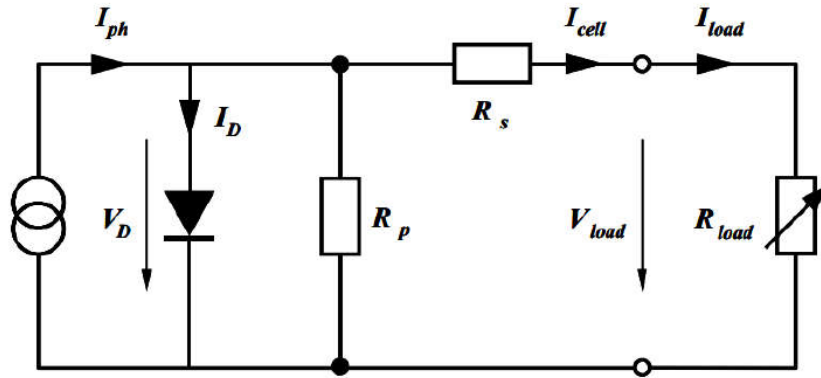


Εικόνα 3: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης (Izadian, Pourtaherian, & Motahari, 2012)

Από το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα μίας ιδανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

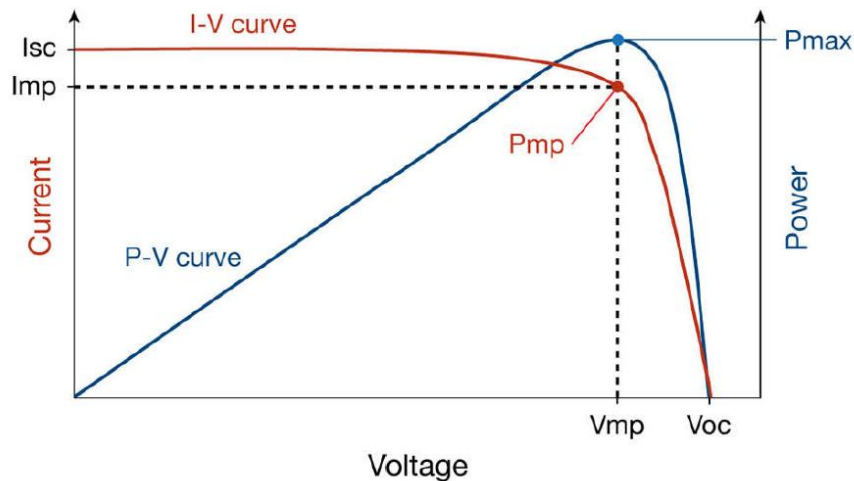
$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0(e^{qV/kT} - 1)$$

Μία πραγματική φωτοβολταϊκή κυψέλη, αποτελείται από δύο αντιστάσεις: μία σε σειρά και μία παράλληλη. Η αντίσταση R_s βρίσκεται σε σειρά με το κύκλωμα και αποτελείται από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η κυψέλη (συνήθως πυρίτιο) και από τις ηλεκτρικές συνδέσεις εσωτερικά στην κυψέλη. Με την αντίσταση R_p αναπαρίστανται τα ρεύματα διαρροής της επαφής p-n της φωτοβολταϊκής κυψέλης.



Εικόνα 4: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικής φωτοβολταϊκής κυψέλης (Izadian, Pourtaherian, & Motahari, 2012)

Η έξοδος μίας φωτοβολταϊκής κυψέλης αναπαρίσταται με ένα γράφημα έντασης – τάσης (I-V). Μέσα από αυτό το γράφημα μπορεί να βρεθεί η σχέση ανάμεσα στην τάση και στην ένταση εξόδου της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Συνήθως, το γράφημα I-V δημιουργείται για ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες συνίστανται σε ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m^2 , θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C και μάζα αέρα 1,5, επειδή η ισχύς εξόδου μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η μάζα του αέρα. Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται Standard Testing Conditions (STC) (Bouraiou, et al., 2015).



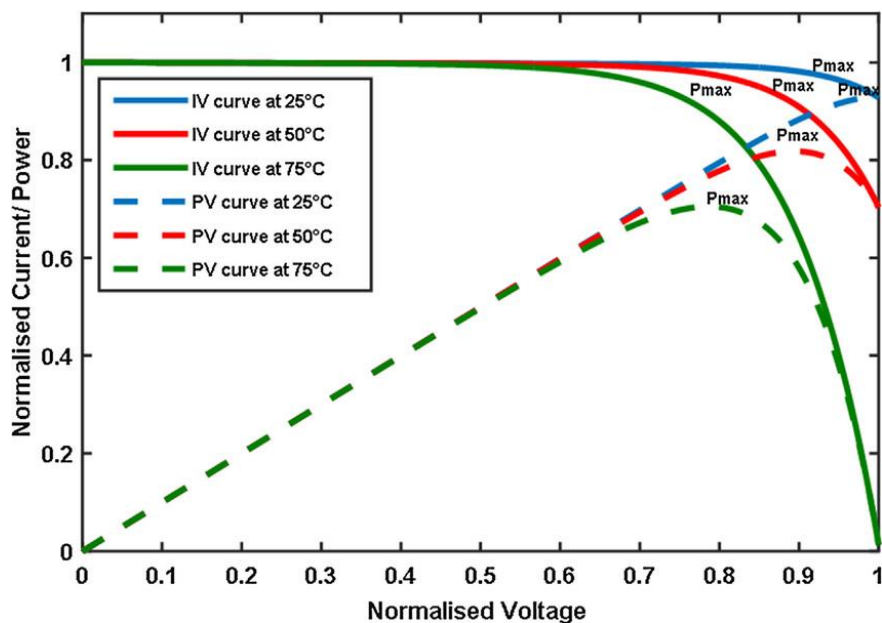
Γράφημα 1: Καμπύλη I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης (Salas, Barrado, & Lazaro, 2006)

Στην καμπύλη έντασης τάσης υπάρχουν τρία σημαντικά σημεία:

- το σημείο μέγιστο ισχύος – maximum power point (MPP), όπου βρίσκεται ο συνδυασμός έντασης και τάσης κατά την παραγωγή της μέγιστης ενέργειας της κυψέλης
- η τάση ανοικτού κυκλώματος – Open Circuit Voltage (V_{oc})
- το ρεύμα βραχυκυκλώματος – Short circuit I (I_{sc})

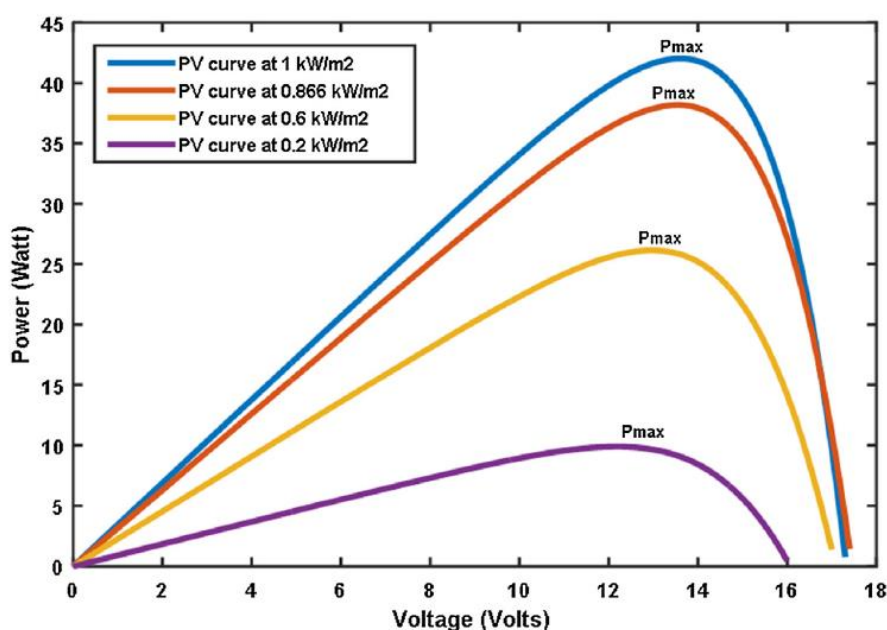
Το σημείο μέγιστο ισχύος της φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι το σημείο όπου η κυψέλη μπορεί να παράγει τη μέγιστή της ισχύ, για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι η μέγιστη τάση, η οποία παρατηρείται όταν δεν τροφοδοτείται κανένα φορτίο, όταν δηλαδή η κυψέλη δεν παράγει ένταση, και το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι το μέγιστο ρεύμα, το οποίο παρατηρείται όταν δεν τροφοδοτείται κανένα φορτίο και η κυψέλη δεν παράγει καθόλου τάση. Βασικό σημείο της θεωρίας γύρω από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και τις φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι ότι δεδομένου ότι οι κυψέλες έχουν πεπερασμένη ισχύ, η ένταση και η τάση του είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη, τα οποία μεταβάλλονται ανάλογα με το φορτίο στο οποίο είναι συνδεδεμένη η κυψέλη αλλά και ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και νέφωσης. Ειδικά σε ό,τι αφορά στις κλιματικές συνθήκες, υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση με τη θερμοκρασία της κυψέλης, άρα και με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και με την ταχύτητα του ανέμου και τη νέφωση. Η ισχύς εξόδου μειώνεται καθώς η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται κάτω από το επίπεδο των $1000\text{W}/\text{m}^2$ (STC) και καθώς αυξάνει η θερμοκρασία της κυψέλης άρα και του περιβάλλοντος, πάνω από τους 25°C (STC) (Cañete, Carretero, & Sidrach-de-Cardona, 2014).

Παρακάτω, (Γράφημα 2) φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας της κυψέλης στην καμπύλη I-V και ειδικά στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Όσο αυξάνει η θερμοκρασία, τόσο χαμηλότερα βρίσκεται το σημείο μέγιστης ισχύος.



Γράφημα 2: Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης για διαφορετικές θερμοκρασίες κυψέλης (Hady, 2017)

Παρακάτω, (Γράφημα 3) φαίνεται η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην καμπύλη I-V και ειδικά στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Όσο μειώνεται η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο χαμηλότερα βρίσκεται το σημείο μέγιστης ισχύος.



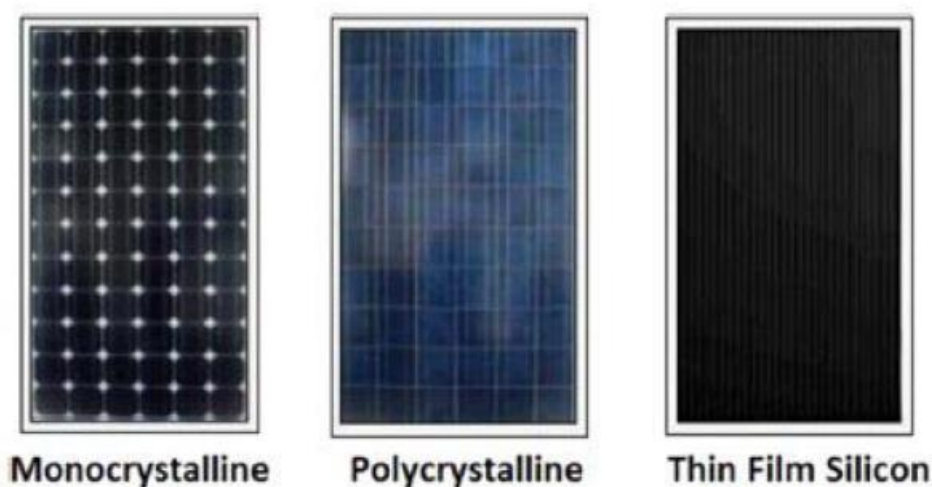
Γράφημα 3: Καμπύλες I-V φωτοβολταϊκής κυψέλης για διαφορετική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (Hady, 2017)

2.2 Τεχνολογίες και υλικά φωτοβολταϊκών στοιχείων

Υπάρχουν τρεις κύριες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πάνελ. Η φωτοβολταϊκή κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ

πρώτης γενιάς και μπορεί να φτάνει σε απόδοση έως και το 32% (Green, Hishikawa, Dunlop, Levi, Hohl-Ebinger, & Ho-Baillie, 2018). Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και άμορφου πυριτίου χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ δεύτερης γενιάς είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά της δεύτερης γενιάς (Alharbi & Kais, 2015). Τα φωτοβολταϊκά πάνελ τρίτης γενιάς κατασκευάζονται, ως επί το πλείστο πειραματικά, από οργανικά και πολυμερή υλικά, και ενσωματώνουν καινοτομίες όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ δύο όψεων, με κυψέλες να βρίσκονται όχι μόνον στην επάνω, αλλά και στην κάτω πλευρά των πάνελ. Παράλληλα, σε πειραματικό στάδιο βρίσκονται τα φωτοβολταϊκά πάνελ τέταρτης γενιάς, τα οποία κατασκευάζονται από συνδυασμό οργανικών και ανόργανων φωτοβολταϊκών κυψελών, επιτρέποντας μεταξύ άλλων την κατασκευή εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ, με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος. Στο μέλλον αναμένεται να κάνουν την εμφάνισή τους φωτοβολταϊκά πάνελ κατασκευασμένα από γραφένιο και νανοϋλικά, αλλά και με ηλεκτρικές συνδέσεις που δεν θα βασίζονται σε αγωγούς χαλκού ή αλουμινίου, προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω η απόδοσή τους (Jayawardena et al 2013; Kant & Singh, 2022).

Παρακάτω, (Εικόνα 5), παρατίθενται οι τρεις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πάνελ:

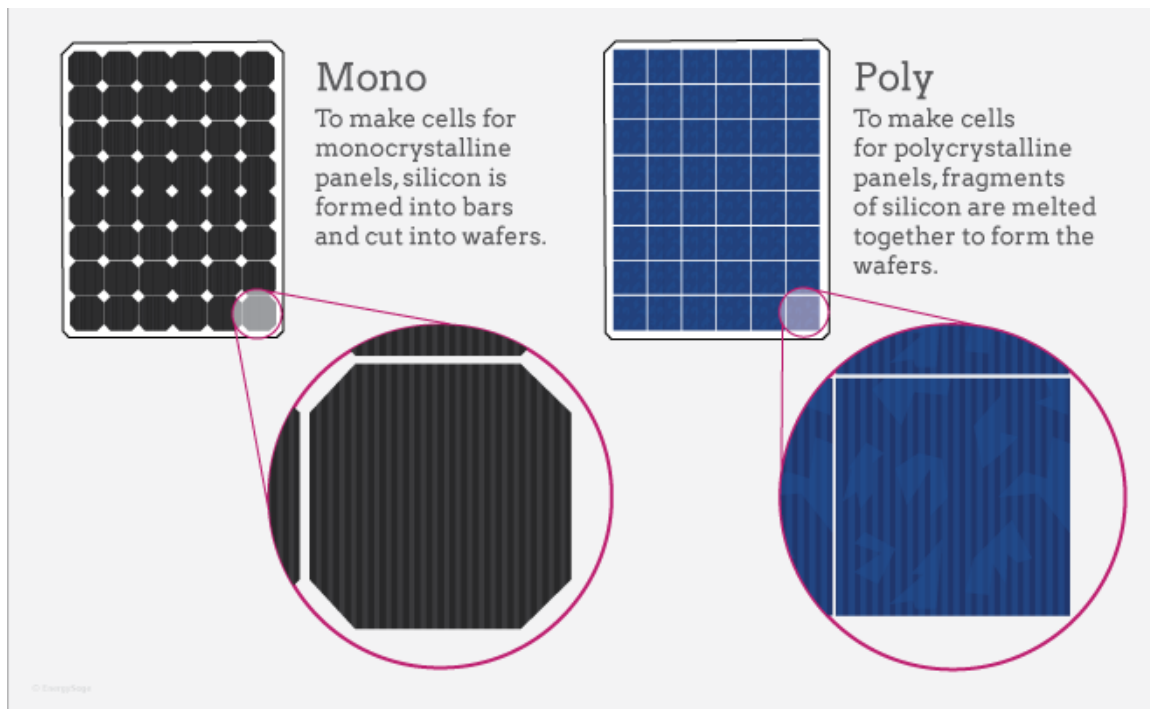


Εικόνα 5: Φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού (αριστερά), πολυκρυσταλλικού (δεξιά) και άμορφου πυριτίου (δεξιά) (EnergySage, 2023)

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου πετυχαίνουν μεγαλύτερες αποδόσεις σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου και σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πάνελ άμορφου πυριτίου, αλλά έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος αγοράς από τα φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από φέτες μονοκρυσταλλικού πυριτίου

(wafers), κατόπιν διαλογής του πυριτίου προκειμένου αυτό να αποτελείται από ένα μόνο τύπο κρυσταλλικού πυριτίου, εξ' ου και η ονομασία τους. Χάρη σε αυτό, στα φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου δημιουργείται φωτόρευμα μεγαλύτερης έντασης, με τη διαφορά δυναμικού (τάση) να παραμένει παραπλήσια με αυτή των φωτοβολταϊκών πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιούνται ομοίως φέτες (wafers) πυριτίου, χωρίς ωστόσο να έχει προηγηθεί διαλογή των κρυστάλλων πυριτίου. Ως εκ τούτου, το φωτόρευμα που δημιουργείται είναι μικρότερο, καθώς διαφορετικοί τύποι κρυστάλλων εμφανίζουν διαφορετική ωμική αντίσταση, και το κόστος τους είναι σημαντικά μικρότερο. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που εξηγούν την επιλογή του πυριτίου για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών πάνελ περιλαμβάνουν την αφθονία του στη φύση, καθώς το πυρίτιο είναι το δεύτερο πιο άφθονο υλικό στη φύση μόνον μετά το οξυγόνο. Πιο συγκεκριμένα, περίπου το 28% του υπεδάφους αποτελείται από πυρίτιο. Επιπρόσθετα, το πυρίτιο δεν είναι τοξικό και ως εκ τούτου είναι περιβαλλοντικά φιλικό υλικό. Επιπλέον, ειδικά κατόπιν θέρμανσής του σε όχι εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, το πυρίτιο μπορεί να κατεργαστεί εύκολα, ενώ οι διαδικασίες διαλογής των κρυστάλλων είναι πλέον αποδοτικές και έχουν πλέον σημαντικά μικρότερο κόστος. Τέλος, καθώς όπως προαναφέρεται το πυρίτιο μπορεί να κατεργαστεί κατόπιν θέρμανσης σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, αυτό το καθιστά κατάλληλο για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ, καθώς δεν χάνει τις ηλεκτρικές ιδιότητές τους σε θερμοκρασίες έως και 125°C. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιείται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ τα οποία πρόκειται να εγκατασταθούν σε εξαιρετικά θερμές περιοχές του κόσμου (Velilla, Ramirez, Uribe, Montoya, & Jaramillo, 2019).

Παρακάτω, (Εικόνα 6), συνοψίζουν καίρια σημεία για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 6: Τρόπος κατασκευής φωτοβολταϊκών πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου (αριστερά) και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (δεξιά) (EnergySage, 2023)

Οι Bianchin et al. (2016) μελέτησαν την απόδοση φωτοβολταϊκών πάνελ διαφορετικών τεχνολογιών, με έμφαση σε μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά, άμορφου πυριτίου, πάνελ από τελλούριο και κάδμιο, πάνελ από χαλκό, ίνδιο και σελήνιο και από χαλκό, ίνδιο, γάλλιο και σελήνιο, με τα πάνελ από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο να αποδίδουν καλύτερα, ειδικά σε συνθήκες νέφωσης, ενώ τα πάνελ άμορφου πυριτίου έχουν την χαμηλότερη απόδοση ανά επιφάνεια εγκατάστασης, αλλά και το μικρότερο κόστος. Σε ό,τι δε αφορά σε πάνελ από τα υπόλοιπα προαναφερόμενα υλικά, απαιτείται η περαιτέρω εξέλιξή τους προκειμένου να καταστεί εφικτή η εμπορική τους διάθεση (Bianchini, Gambuti, Pellegrini, & Saccani, 2016). Σύμφωνα με μελέτη των Carr και Pryor (2004), τα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου, όπου οι επαφές έχουν κυματοειδή μορφή και οι συνδέσεις ανάμεσα στις κυψέλες πραγματοποιούνται με laser, και όχι με χαλκό εμφάνιζαν υψηλότερη απόδοση από άλλες τεχνολογίες πάνελ (Carr & Pryor, 2004). Σύμφωνα με τους Bashir et al. (2014), οι οποίοι πειραματίστηκαν με φωτοβολταϊκά πάνελ από μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο, τα φωτοβολταϊκά πάνελ από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο περισσότερο από τη διπλάσια απόδοση σε σχέση με φωτοβολταϊκά πάνελ από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, και την τριπλάσια απόδοση σε σχέση με φωτοβολταϊκά πάνελ από άμορφο πυρίτιο (Bashir, Ali, Khalil, Ali, & Siddiqui, 2014). Οι Visa et al. (2016) μελέτησαν διαφορετικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πάνελ και πρότειναν ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου αποδίδουν καλύτερα σε τοποθεσίες με χαμηλές θερμοκρασίες και σε ορεινές εγκαταστάσεις, ενώ ειδικά στο αστικό περιβάλλον

απαιτείται η ενδελεχής μελέτη των κλιματικών συνθηκών προκειμένου να επιλεγούν φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Τα δε πάνελ άμορφου πυριτίου και πάνελ από άλλα υλικά πέτυχαν σημαντικά χαμηλότερες αποδόσεις (Visa, Burduhos, Neagoe, Moldovan, & Duta, 2016).

Μολονότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου πετυχαίνουν ελαφρώς καλύτερες αποδόσεις, ειδικά παρουσία νεφώσεων, εντούτοις το υψηλότερο κόστος τους σε σχέση με τα πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου εκμηδενίζει τη διαφορά στην απόδοση, και ως εκ τούτου τα φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν τη μεγαλύτερη διείσδυση, άνω του 90% στην αγορά (Ribeyron, 2017).

Σε ό,τι αφορά στη μελλοντική διείσδυση των διαφορετικών τεχνολογιών φωτοβολταϊκών πάνελ, τα φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου αναμένεται να ξεπεράσουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Περίπου το 80% των καινούριων φωτοβολταϊκών πάνελ είναι μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με το υπολειπόμενο 20% να είναι πολυκρυσταλλικού πυριτίου και τα φωτοβολταϊκά πάνελ άλλων τεχνολογιών να έχουν είναι κάτω από το 1%. Μάλιστα, μέχρι το τέλος της δεκαετίας, τα φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου αναμένεται να αποτελούν περίπου το 95% των εγκατεστημένων πάνελ παγκοσμίως, με το υπόλοιπο 5% να είναι φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Solar Business Hub, 2020). Δεδομένης της ανάγκης για μετάβαση σε πράσινη ανάπτυξη, εντάθηκε η ζήτηση για φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία αποδίδουν περισσότερη ισχύ σε μικρότερη επιφάνεια εγκατάστασης, αυξάνοντας τη ζήτηση για φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ενδεικτικά, η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ έχει σχεδόν διπλασιαστεί την τελευταία δεκαετία, ξεπερνώντας τα 500Wp από τα περί τα 250Wp κοντά στο 2010 (Eguren, Martínez-Moreno, Merodio, & Lorenzo, 2022).

Επιπλέον, στην παρούσα παράγραφο αναφέρεται ένα ακόμη δομικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών συστημάτων, οι αντιστροφείς (inverters), καθώς παίζουν καίριο ρόλο στη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο ρόλος των αντιστροφέων είναι η μετατροπή της παραγόμενης DC ισχύος από τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε AC ισχύ, με συχνότητα και επίπεδο τάσης κατάλληλο ώστε να εγχυθεί στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αντιστροφείς κατασκευάζονται από ηλεκτρονικά ισχύος, προκειμένου όχι μόνον να περιορίζεται ο όγκος τους, αλλά και προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες κατά τη μετατροπή της DC ισχύος σε AC ισχύ. Ως εκ τούτου, οι σύγχρονοι αντιστροφείς για φωτοβολταϊκά συστήματα επιτυγχάνουν αποδόσεις άνω του 95% και έως και 99%. Επιπρόσθετα, πέραν της τεχνολογίας κατασκευής τους, οι αντιστροφείς για φωτοβολταϊκά συστήματα τείνουν να υποβαθμίζουν την

ονομαστική τους ισχύ όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεπερνά συγκεκριμένα όρια. Η δε σημαντικότερη λειτουργία των αντιστροφών για φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η παρακολούθηση της καμπύλης έντασης – τάσης των συστοιχιών φωτοβολταϊκών πάνελ οι οποίες συνδέονται στον αντιστροφέα και η αποτελεσματική ρύθμιση της σχέσης ανάμεσα στην τάση και στην ένταση, έτσι ώστε οι συστοιχίες των φωτοβολταϊκών πάνελ να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης παραγωγής τους. Η λειτουργία αυτή επιτελείται από ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες παρακολουθούν την καμπύλη έντασης – τάσης στις εισόδους του αντιστροφέα, οι οποίοι ονομάζονται Maximum Power Point Trackers (MPPT) (Vidyanandan, 2017).

Επιπρόσθετα, οι αντιστροφείς για φωτοβολταϊκά συστήματα επιτηρούν το επίπεδο της τάσης εισόδου (από το δίκτυο) και της τάσης εξόδου, προκειμένου να ρυθμίζεται η τάση εξόδου, αλλά και προκειμένου να διακόπτεται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος όταν υπάρχει κάποια βλάβη (π.χ. απουσία φάσης, παρουσία ομοπολικών συνιστωσών, απόκλιση της συχνότητας) στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα, οι αντιστροφείς επιτηρούν διαρκώς την τυχόν διαρροή έντασης από τις εισόδους τους, άρα από τις συστοιχίες των φωτοβολταϊκών πάνελ προς τη γη, και διαθέτουν προστασίες έναντι κεραυνικών πληγμάτων, για την προστασία τόσο των ιδίων των αντιστροφών, αλλά και των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ (Custer, 2021). Τα τελευταία χρόνια, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 4.3 έχουν κάνει την εμφάνισή τους υβριδικοί αντιστροφείς, οι οποίοι επιπρόσθετα από τις παραπάνω λειτουργίες έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν και ως ρυθμιστές φόρτισης για διατάξεις μπαταριών, με τη χρήση τους να είναι ευρεία κυρίως σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα με διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Αναγκαιότητα αποθηκευτικής διάταξης σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα με αποθήκευση ενέργειας (μπαταρίες) κερδίζουν ολοένα περισσότερο έδαφος, ως πιθανή λύση στην αντιμετώπιση της στοχαστικότητας της ηλιακής ενέργειας, στην κατεύθυνση βελτίωσης της ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτούνται και από φωτοβολταϊκά πάρκα. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά εξετάζονται και ως πιθανή λύση στην αποτελεσματική μείωση του μέρους του ενεργειακού μίγματος το οποίο προέρχεται από καύση ορυκτών καυσίμων και εν γένει για την ενίσχυση της πρασινότητας της ηλεκτρικής ενέργειας. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, τυχόν πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε συστοιχίες μπαταριών, προκειμένου να μπορεί να διοχετευθεί αργότερα είτε στο δίκτυο είτε τοπικά στον ίδιο τον αυτοπαραγωγό καταναλωτή, ειδικά σε περιόδους χαμηλής ή καθόλου ηλιοφάνειας και κατά τη διάρκεια της νύχτας, έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί το ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλο το εικοσιτετράωρο (Khezri, Mahmoudi, & Aki, 2022).

Τα συστήματα αυτά μπορούν να χαρακτηρίζονται καινοτόμα, καθώς συγκεντρώνουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης εξάρτησης από την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου, των χαμηλότερων λογαριασμών ηλεκτρικής ενέργειας και των μειωμένων εκπομπών άνθρακα. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία μπαταριών έχουν βελτιώσει σημαντικά τη σκοπιμότητα και την ελκυστικότητα των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων με αποθήκευση ενέργειας, ειδικά κατόπιν της μεγάλης διεύδυσης των μπαταριών λιθίου – ιόντων (Diouf & Pode, 2015). Οι μπαταρίες αυτές, που πλέον χρησιμοποιούνται ευρέως και σε φωτοβολταϊκά και υβριδικά συστήματα έχουν σημαντικά υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από μπαταρίες άλλων τεχνολογιών (π.χ. μόλυβδου – οξέος), μεγάλη διάρκεια ζωής και μειωμένο κόστος (σε όλη τη διάρκεια ζωής τους), καθιστώντας τις βέλτιστη επιλογή για ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα με αποθήκευση ενέργειας (Nykvist & Nilsson, 2015).

Οι κυριότερες προκλήσεις που εξετάζονται στη βιβλιογραφία σε ό,τι αφορά σε φωτοβολταϊκά συστήματα με μπαταρίες περιλαμβάνουν τη διαστασιολόγηση της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας, το βάθος εκφόρτισης των μπαταριών, τις απώλειες από την αποθήκευση μέχρι και την αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας, και τις ίδιες τις απώλειες των μπαταριών (π.χ.

λόγω αυτοεκφόρτισης ή λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών κ.α.). Το ενεργειακό προφίλ, για παράδειγμα διαμέσου αξιολόγησης της καμπύλης φορτίου του καταναλωτή, παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαστασιολόγηση των διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας και να βελτιστοποιείται η απόδοση του συστήματος (Palizban & Kauhaniemi, 2016). Στην κατεύθυνση αυτή, εντοπίζονται διάφορες μέθοδοι διαστασιολόγησης, οι οποίες θα αξιολογηθούν σε επόμενη παράγραφο (Mulleriyawage & Shen, 2021). Σε ό,τι αφορά στην ποιότητα της ισχύος (power quality), η ανάγκη για μεγιστοποίησή της και διατήρησή της σε υψηλά επίπεδα είναι αδήριτη, όπως άλλωστε σε όλες τις εφαρμογές των ενεργειακών συστημάτων. Τονίζεται ότι η ποιότητα της ισχύος εξαρτάται τόσο από την ποιότητα της τάσης όσο και από την ποιότητα του ρεύματος, με την ανάγκη η τάση και το ρεύμα να διατηρούνται σε σταθερά και εντός προκαθορισμένου εύρους όρια, με τη συχνότητα να διατηρείται ομοίως εντός ορισμένων ορίων και την απουσία φαινομένων όπως είναι οι αρμονικές και οι ομοπολικές συνιστώσες. Καθοριστικής σημασίας είναι η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού προκειμένου να διατηρείται υψηλή η ποιότητα της ισχύος, καθώς ο εξοπλισμός για την αντιστροφή της DC ισχύος σε AC και για τη φόρτιση των μπαταριών ενσωματώνει ηλεκτρονικά ισχύος (Yadav & Yadav, 2021). Παράλληλα, καθοριστικής σημασίας είναι και η επιλογή των μπαταριών, καθώς μπορεί να χάνουν σημαντικό μέρος της απόδοσής τους με την πάροδο του χρόνου, οδηγώντας σε υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος και εν γένει σε απώλεια της αξιόπιστης και αποδοτικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος (Hannan, και συν., 2021). Ωστόσο, σημειώνεται στο εισαγωγικό αυτό σημείο, ότι η εξασφάλιση υψηλής ποιότητας ισχύος σε επίπεδο φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να συνεισφέρει στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και της ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο τυχόν συνδέεται ένα τέτοιο φωτοβολταϊκό σύστημα με μπαταρίες (Lehtola & Zahedi, 2019; Ovaskainen, et al., 2019).

Σε κάθε περίπτωση, πριν από την αξιολόγηση των παραπάνω τεχνικών πτυχών των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες, θα πρέπει να αξιολογηθεί η εφαρμοζόμενη πολιτική και το εκάστοτε ρυθμιστικό πλαίσιο. Οι πολιτικές και τα ρυθμιστικά πλαίσια πρέπει να επιτρέπουν την κατασκευή και διασύνδεση τέτοιων συστημάτων (αν πρόκειται για διασυνδεδεμένα και όχι αυτόνομα έργα) και θα πρέπει να κινητοποιούν την κατασκευή τέτοιων έργων, στην κατεύθυνση απολιγνιτοποίησης και ενίσχυσης της ευστάθειας των εθνικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην Ελλάδα εισήχθη στη νομοθεσία η δυνατότητα κατασκευής διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες μόλις το 2018 (Νόμος 4513/2018, 2018). Πρόσφατα μάλιστα η κυβέρνηση έλαβε

πρωτοβουλία για την επιδότηση κατασκευής οικιακών και επαγγελματικών διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών με μπαταρίες, προκειμένου να ενισχύσει τη διείσδυση των ΑΠΕ (ΥΠΕΝ/ΥΔΕΝ/47129/720/2023, 2023).

Η ανάπτυξη ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων με το BESS (Battery Energy Storage Systems) καθοδηγείται επίσης από υποστηρικτικές πολιτικές και ρυθμιστικά πλαίσια (Sajn, 2016). Οι πολιτικές αυτές ενθαρρύνουν τις επενδύσεις σε ηλιακές τεχνολογίες και τεχνολογίες αποθήκευσης, καθώς και διευκολύνουν την ενοποίηση του δικτύου, η οποία είναι κρίσιμη για την επίτευξη υψηλής διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (IRENA, 2020).

Το παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο έχει μετασηματιστεί σημαντικά λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως λόγω της ανάγκης διαχείρισης της κλιματικής αλλαγής και ενίσχυσης της ενεργειακής ασφάλειας. Η ηλιακή ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά συστήματα συγκεντρώνουν σημαντικό ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να εγκαθίστανται τόσο σε κτήρια όσο και σε χωράφια – γήπεδα, και μπορούν να παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας, με ικανότητα πρόβλεψης της παραγωγής (Al-Shahri, και συν., 2021). Παράλληλα, στη βάση των παραπάνω πλεονεκτημάτων, μπορούν να συνεισφέρουν καθοριστικά στην αποκέντρωση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με οφέλη σε όρους ευστάθειας των ΣΗΕ και βελτίωσης της ποιότητας ισχύος (Asif, 2022).

Ωστόσο, όπως όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έτσι και η ηλιακή ενέργεια είναι στοχαστική, ως εκ τούτου μολονότι μπορεί να γίνει μία σχετικά ακριβής πρόβλεψη για την προσδοκώμενη παραγωγή ενέργειας, εντούτοις, η διαθεσιμότητα ενέργειας εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες, ενώ παράλληλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν παράγουν ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επιπρόσθετα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε η καμπύλη της παραγόμενης ενέργειας να ακολουθεί την καμπύλη της ζήτησης. Ως εκ τούτου υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στους χρόνους αιχμής της παραγωγής και της ζήτησης, δημιουργώντας ουσιαστικά εμπόδια στην πλήρη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Μάλιστα, τα εμπόδια αυτά είναι καθοριστικά, καθώς δεν είναι εφικτή η κάλυψη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά συστήματα. Στην κατεύθυνση αυτή, το ακαδημαϊκό και τεχνικό ενδιαφέρον έχει στραφεί τα τελευταία χρόνια στα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία διαθέτουν διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, στην κατεύθυνση καλύτερης κάλυψης της ζήτησης ενέργειας και επέκτασης των ωρών που μπορούν τα φωτοβολταϊκά να καλύπτουν τη ζήτηση ενέργειας. Οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπουν την αποθήκευση πλεονάζουσας ηλεκτρικής

ενέργειας που παράγεται κατά τις ώρες αιχμής η οποία εγχέεται στο δίκτυο ετεροχρονισμένα σε περιόδους χαμηλής ή καθόλου ηλιακής παραγωγής.

Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και των μπαταριών και λοιπών διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την απολιγνιτοποίηση και για τον εκσυγχρονισμό των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με τη δυνατότητα να επιταχυνθεί η μετάβαση προς καθαρότερα, πιο ανθεκτικά και πιο ευέλικτα ενεργειακά συστήματα (Feldman & Bolinger, 2016; Mileva, et al., 2016).

Τα πλέον σημαντικά ζητήματα τα οποία αξιολογούνται στα πλαίσια της παρούσης περιλαμβάνουν το σχεδιασμό και τη μελέτη, την αξιολόγηση της απόδοσης, την οικονομική μελέτη και ανάλυση, τις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις και τις τάσεις στα πλαίσια διεύθυνσης φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες στην κατεύθυνση διαχείρισης της κλιματικής αλλαγής (Hill, et al., 2012; Gurung & Qiao, 2018).

Ο σχεδιασμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης του συστήματος. Τυχόν ελλείματα κατά το σχεδιασμό μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπάρκειες και να μειώσουν τα οικονομικά οφέλη του συστήματος. Ως εκ τούτου, μεγάλο μέρος της έρευνας σε αυτόν τον τομέα έχει επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης του συστήματος, τόσο του φωτοβολταϊκού συστήματος όσο και της αποθήκης ενέργειας, και στο σχεδιασμό των διατάξεων που διασυνδέουν τα δύο επιμέρους συστήματα. Το διακύβευμα κατά το σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες είναι η επιλογή της βέλτιστης διάταξης που θα εξασφαλίζει την καλύτερη ισορροπία ανάμεσα στο κόστος, την αξιοπιστία, την αυτονομία, την απόδοση και τη διάρκεια ζωής (Bilal, et al., 2010; Chatzinikolaou & Rogers, 2016; Le, et al., 2023).

Σύμφωνα με τους Zhang et al. (2015), τα φωτοβολταϊκά συστήματα με μπαταρίες τα οποία λειτουργούν είτε διασυνδεδεμένα με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είτε σε μικροδίκτυα ή ως αυτόνομα συστήματα μπορούν να επιτύχουν έως και 90% αυτονομία, δηλαδή έως και 90% κάλυψη της ζήτησης της ενέργειας. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση τέτοιων συστημάτων περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία, την καμπύλη ζήτησης και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα, σημειώνεται ότι η διαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες είναι κρίσιμη, καθώς τυχόν υπό – διαστασιολογημένα συστήματα δεν μπορούν να καλύψουν σημαντικό μέρος της ζήτησης, ενώ υπέρ – διαστασιολογημένα συστήματα έχουν κακή οικονομική απόδοση και αργούν να αποσβέσουν, ενώ παράγουν ενέργεια με υψηλό κόστος (Li, και συν., 2015).

Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια πανάκεια στο σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες, καθώς ο σχεδιασμός πρέπει να προσαρμόζεται στις συνθήκες κάθε έργου. Σύμφωνα με ακαδημαϊκούς, η βέλτιστη διαμόρφωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις μεθόδους και στρατηγικές για τη διαχείριση της φόρτισης και της εκφόρτισης της αποθήκης ενέργειας, είτε σε τοπικό επίπεδο είτε σε επίπεδο δικτύου (Taslimi, Ahmadi, Ashjaee, & Rosen, 2021) (Jasim, Jasim, Baiceanu, & Neagu, 2023). Τυχόν αποκοπές φωτοβολταϊκών με μπαταρίες από το δίκτυο, σε περιόδους χαμηλής ζήτησης μπορεί να οδηγήσει σε εξάντληση των αποθηκών ενέργειας, σε χειροτέρευση της οικονομικής απόδοσης των συστημάτων και σε έλλειμα ισχύος κατά τις περιόδους ισχύος (Eldahab, Saad, & Zekry, 2016).

Σε κάθε περίπτωση, η διείσδυση και η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες εξαρτάται από τις τεχνολογικές εξελίξεις τόσο στο πεδίο των φωτοβολταϊκών συστημάτων όσο και στο πεδίο των μπαταριών. Σε ό,τι αφορά στα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα τελευταία δέκα χρόνια σημειώνονται σημαντικές εξελίξεις με την απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ να αυξάνεται σημαντικά, ειδικά χάρη σε εξελίξεις στα χρησιμοποιούμενα υλικά και στις εφαρμοζόμενες μεθόδους παραγωγής (Chen, et al., 2021; Novas, et al., 2021). Οι εξελίξεις αυτές έχουν καταστήσει εφικτή την παραγωγή περισσότερης ηλεκτρικής για περισσότερες ώρες και ακόμη και σε συνθήκες νέφωσης, ενώ έχουν καταστήσει εφικτή την κατασκευή συστημάτων μεγαλύτερης ισχύος σε μικρότερες επιφάνειες. Συνδυαστικά, οι εξελίξεις στο πεδίο των φωτοβολταϊκών συστημάτων και δη στις φωτοβολταϊκές κυψέλες έχουν οδηγήσει σε μείωση του κόστους, ενισχύοντας τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων (Chen, et al., 2021; Li, et al., 2022; Sikiru, et al., 2022).

Παράλληλα, σημειώνονται σημαντικές εξελίξεις στο πεδίο των μπαταριών, οι οποίες καθιστούν ευκολότερη τη διείσδυση φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες. Σύμφωνα με τους Horppman et al. (2014) σημειώνονται εξελίξεις σε ό,τι αφορά στην ενεργειακή πυκνότητα, τη διάρκεια ζωής, το βάθος εκφόρτισης και τις απώλειες αυτοεκφόρτισης ήδη από το 2014 (Horppmann, Volland, Schmidt, & Hoffmann, 2014). Ο Worku (2022) σημειώνει σημαντικές εξελίξεις μέσα από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των μπαταριών ιόντων λιθίου, οι οποίες πλέον κυριαρχούν όχι μόνον στην ηλεκτροκίνηση αλλά και στα φωτοβολταϊκά συστήματα (Worku, 2022). Παράλληλα, άλλοι ακαδημαϊκοί εξετάζουν την αξιοποίηση άλλων, εναλλακτικών τεχνολογιών μπαταριών οι οποίες θα μπορούσαν να επιτρέψουν την περαιτέρω διείσδυση φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες (Krichen, Basheer, Qaisar, & Waqar, 2023).

Σε ό,τι αφορά στην οικονομική απόδοση των συστημάτων φωτοβολταϊκών με μπαταρίες, σύμφωνα με τους Khan et al. (2022) σημειώνεται σημαντική μείωση του σταθμισμένου κόστους της ενέργειας (LCOE) την τελευταία δεκαετία (Khan, Wazeer, Almutairi, & Alanazi, 2022). Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τους Chaurasia et al. (2022), εκτός από τη μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας, καταγράφεται μείωση της ευαισθησίας της οικονομικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών με μπαταρίες χάρη στην εξέλιξη ειδικά στον τομέα των μπαταριών (Chaurasia, Gairola, & Pal, 2022). Μάλιστα, ήδη από το 2015, καταγράφεται σημαντική μείωση του κόστους των μπαταριών ιόντων λιθίου, και πιο συγκεκριμένα μείωση της τάξης του 14% κατά έτος από το 2007 έως το 2014 (Nykvist & Nilsson, 2015). Ωστόσο, θα πρέπει παράλληλα να καταγραφεί ότι ειδικά μετά την πανδημία του COVID19 και τον πόλεμο στην Ουκρανία μειώθηκε η διαθεσιμότητα πρώτων υλών για την κατασκευή μπαταριών με αποτέλεσμα την εκ νέου αύξηση των τιμών και την σημαντική επιμήκυνση των χρόνων παράδοσης (Kuzemko, Blondeel, Dupont, & Brisbois, 2022). Επιπρόσθετα, πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντική πρόκληση σε ό,τι αφορά στην οικονομική όσο και στην περιβαλλοντική διαχείριση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μπαταρίες εισάγει η ανάγκη διαχείρισης των μπαταριών όταν αυτές φτάσουν στο πέρας του κύκλου ζωής τους (Yudhistira, Khatiwada, & Sanchez, 2022). Τέλος, σημειώνεται ότι στα πλαίσια των εντατικών πολιτικών παρεμβάσεων για την επιτάχυνση της απολιγνιτοποίησης, ειδικά μετά την υιοθέτηση του χρηματιστηρίου ενέργειας, η ζήτηση για φωτοβολταϊκά συστήματα και δη για φωτοβολταϊκά συστήματα με μπαταρίες αυξάνει και βελτιώνεται παράλληλα η βιωσιμότητα αυτών των συστημάτων (Walker, Hischer, & Schlueter, 2022).

Ειδικά σε ό,τι αφορά στην Ελλάδα και δη στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ), η εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ και η διασύνδεσή τους με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας εμπίπτει σε αυστηρά όρια, ειδικά σχετικά με την μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ. Σε κάθε περίπτωση, υπό την υπόθεση ότι τα όρια μέγιστης εγκατεστημένης ισχύος αίρονταν, από τα παραπάνω αναφερόμενα προκύπτει μεγάλη σκοπιμότητα και ανάγκη συνδυασμού μονάδων ΑΠΕ με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, από τη σύνθεση των παραπάνω ευρημάτων από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι ο συνδυασμός δύο τουλάχιστον πηγών ΑΠΕ (π.χ. φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να δώσει τη βέλτιστη απόδοση αλλά και τα μεγαλύτερα οφέλη σε όρους ευστάθειας, αξιοπιστίας και αυτονομίας του δικτύου. Παραπάνω εντοπίζεται πληθώρα ερευνητών που υποστηρίζουν τα οφέλη αυτά, ενώ σε συνδυασμό με τα προαναφερόμενα σε ό,τι αφορά στο χρηματιστήριο ενέργειας, η ενσωμάτωση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε σταθμούς ΑΠΕ

μπορεί όχι μόνον να εξομαλύνει το ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης σε ώρες αιχμής αλλά και να καλύψει τις ζητήσεις ακόμη και των ωρών αιχμής και κατά τη διάρκεια της νύχτας με πράσινη ενέργεια. Η δε επιλογή της μορφής ή των μορφών και της ποσόστωσης των ΑΠΕ βασίζεται στο διαθέσιμο δυναμικό κάθε μορφής ΑΠΕ, στη μελέτη του διαθέσιμου χώρου εγκατάστασης, του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και του ύψους των τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία διαφέρει για ενέργεια παραγόμενη ενδεικτικά από φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα.

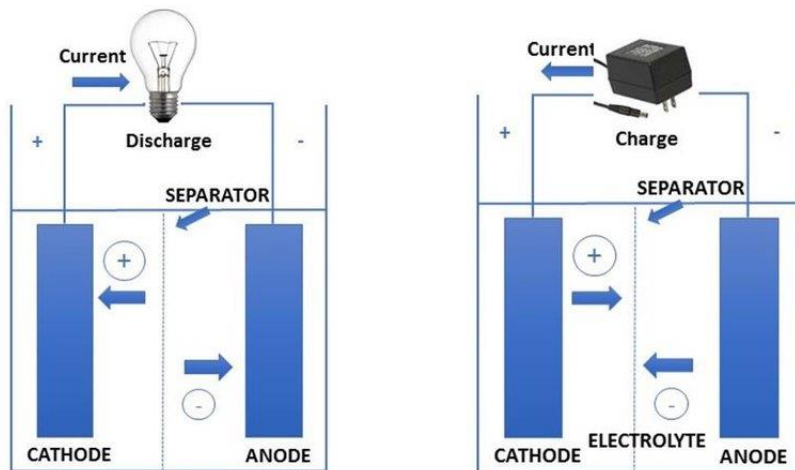
Στην περίπτωση της Ελλάδας και σε ό,τι αφορά στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, σύμφωνα με την απόφαση 616/2016 της ΡΑΕ υπάρχει περιορισμένο περιθώριο εγκατάστασης σταθμών ΑΠΕ. Τα αιολικά πάρκα μπορούν να καλύπτουν έως το 55% του ετήσιου μέσου φορτίου και τα φωτοβολταϊκά μπορούν να καλύπτουν έως το 37% του ετήσιου μέσου φορτίου. Τα όρια αυτά, βάσει της παραπάνω απόφασης μπορούν να αυξάνονται αν οι μονάδες διαθέτουν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, προκειμένου να μην γίνονται αποκοπές της παραγωγής και να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα των έργων και του δικτύου. Ως εκ τούτου, σε συνδυασμό με τα παραπάνω ευρήματα και σε συνδυασμό με το εφαρμοζόμενο target model, με σκοπό την επίτευξη ίσων τιμών ενέργειας σε όλο το δίκτυο, η επιλογή τόσο του συνδυασμού αιολικών και φωτοβολταϊκών όσο και διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας είναι δόκιμη. Πιο συγκεκριμένα προκύπτουν τα παρακάτω οφέλη:

- Ο συνδυασμός αιολικών και φωτοβολταϊκών επιτρέπει την ομαλότερη κάλυψη των φορτίων κατά τη διάρκεια του 24ώρου και του έτους, καθώς και οι δύο ΑΠΕ είναι στοχαστικές, με τα αιολικά να μπορούν να καλύπτουν φορτία το βράδυ και σε περιόδους νεφώσεων και κακοκαιρίας.
- Η ενσωμάτωση διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει την υπέρβαση των παραπάνω περιορισμών στην εγκατεστημένη ισχύ αιολικών και φωτοβολταϊκών
- Η ενσωμάτωση διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει την ομαλότερη διαχείριση της παραγωγής της ενέργειας και της προσφοράς της στο δίκτυο, ιδίως κατά τις ώρες αιχμής και κατά τις περιόδους κακοκαιρίας ή νεφώσεων

3.2 Αρχή λειτουργίας και δομή συσσωρευτών

Στους συσσωρευτές η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια προκειμένου να γίνει εφικτή η αποθήκευσή της. Κατόπιν, μετατρέπεται εκ νέου σε ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να διοχετευθεί στο δίκτυο.

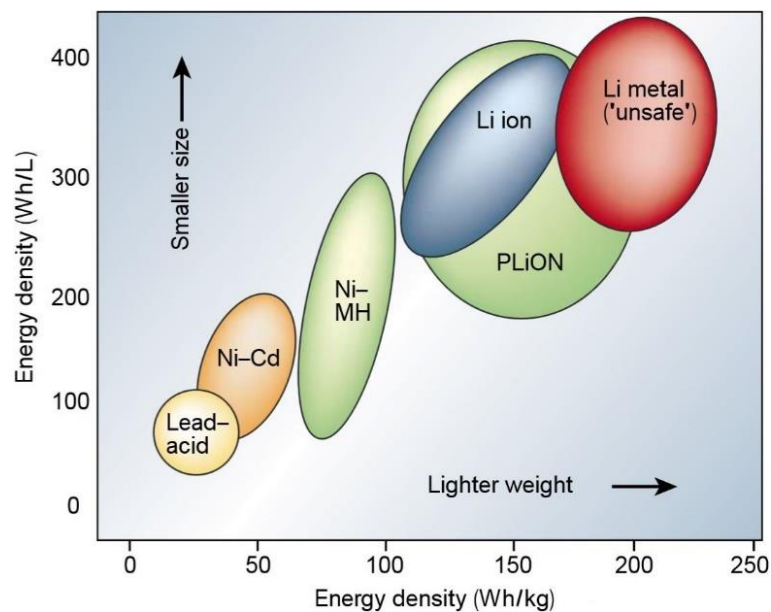
Ως εκ τούτου, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η αρχή λειτουργίας των μπαταριών μπορεί να περιγραφεί ως «η αμφίδρομη ηλεκτροχημική διεργασία η οποία επιτρέπει την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική ενέργεια και εκ νέου της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική». Η βασική αυτή αρχή λειτουργίας των συσσωρευτών είναι κοινή και δεν αλλάζει ανάλογα με τον τύπο και την τεχνολογία των συσσωρευτών. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι ανάλογα με τον τύπο και την τεχνολογία του συσσωρευτή, οι χημικές αντιδράσεις και τα φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό ενός συσσωρευτή είναι διαφορετικά.



Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας μπαταριών (αριστερά εκφόρτιση, δεξιά φόρτιση) (Shamsi, 2016)

3.3 Είδη συσσωρευτών

Τόσο στη βιβλιογραφία όσο και στο εμπόριο εντοπίζεται πληθώρα τύπων μπαταριών, ακόμη και διαφορετικοί επιμέρους τύποι μπαταριών βασισμένων στην ίδια τεχνολογία. Ως εκ τούτου, σημειώνεται ότι οι κύριες διαφορές ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους μπαταριών περιλαμβάνουν την πυκνότητα της ενέργειας η οποία μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτές και την ειδική ενέργειά τους, το βάθος εκφόρτισής τους, τον όγκο τους, το κόστος αγοράς και τη διάρκεια ζωής τους (Deng, 2015).



Εικόνα 8: Ενεργειακή πυκνότητα και ειδική ενέργεια διαφορετικών τύπων μπαταριών (Deng, 2015)

Σύμφωνα με τον Deng (2015), οι μπαταρίες μολυβδου οξέος έχουν την χαμηλότερη ειδική ενέργεια και ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τις υπόλοιπους τύπους μπαταριών, ενώ οι μπαταρίες λιθίου ιόντων εμφανίζουν λίγο μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα και ειδική ενέργεια από τις μπαταρίες μαλακού πλαστικού λιθίου ιόντων (PLiON) (Deng, 2015). Οι δε μπαταρίες λιθίου μετάλλου δεν έχουν ακόμη εμπορική εφαρμογή καθώς δεν έχουν ωριμάσει επαρκώς ερευνητικά. Αξίζει να σημειωθεί πως η διαφοροποίηση των μπαταριών λιθίου ιόντων από τις μπαταρίες μολυβδου οξέος αντικατοπτρίζεται στο κόστος κτήσης αμφοτέρων, με τις δεύτερες να έχουν σαφώς μικρότερο κόστος. Εντούτοις, η επιλογή του τύπου μπαταρίας βασίζεται στην σκοπούμενη χρήση της, καθώς οι μπαταρίες μολυβδου οξέος έχουν τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο όγκο από τις μπαταρίες λιθίου ιόντων προκειμένου να επιτευχθεί η ίδια χωρητικότητα. Επιπρόσθετα, διαφορετικοί τύποι μπαταριών διαφοροποιούνται μεταξύ τους σε ό,τι αφορά στους χρόνους φόρτισης και εκφόρτισης, σε ό,τι αφορά στο συντελεστή αυτοεκφόρτισης, αλλά και σε ό,τι αφορά στις θερμοκρασίες στις οποίες αυτές μπορούν να λειτουργούν.

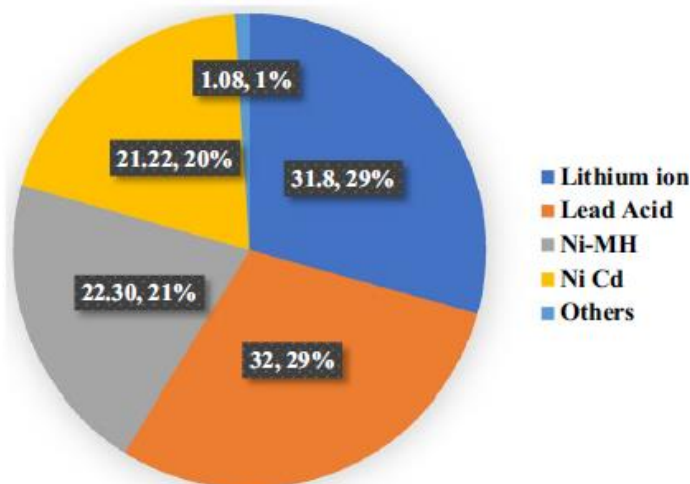
Παρακάτω παρατίθενται διαφορετικοί τύποι μπαταριών:

- λιθίου ιόντων
 - οξειδίου λιθίου-κοβαλτίου (LCO)
 - οξειδίου λιθίου-μαγγανίου (LMO)

- οξειδίου λιθίου-νικελίου-μαγγανίου-κοβαλτίου (NMC)
- φωσφορικού λιθίου- σιδήρου (LFP)
- οξειδίου λιθίου-νικελίου- κοβαλτίου-αλουμινίου (NCA)
- οξειδίου λιθίου-τιτανίου (LTO)
- οξέος μόλυβδου
 - μόλυβδου-αντιμονίου (Pb-Sb)
 - μόλυβδου-ασβεστίου (Pb-Ca)
 - μόλυβδου-αντιμονίου και μόλυβδου-ασβεστίου (Pb-Sb/Pb-Ca)
- νικελίου-καδμίου
- νικελίου- σιδήρου
- νικελίου- ψευδαργύρου
- άλλοι τύποι

Το συνολικό μέγεθος της αγοράς των μπαταριών έφτασε στα 108,4 δισεκατομμύρια δολάρια το 2019 και αναμένεται να αυξηθεί κατά 14,1% από το 2020 έως το 2027. Οι μπαταρίες μόλυβδου οξέος αποτελούν το δεύτερο μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς, καθώς αντιπροσώπευαν το 29% της παγκόσμιας αγοράς το 2019. Αν και η διείσδυση των μπαταριών ιόντων λιθίου αυξάνεται σταθερά, ειδικά λόγω της εφαρμογής τους σε ηλεκτρικά οχήματα και ηλεκτρονικές συσκευές, συνολικά αντιπροσώπευαν το 31,8% της παγκόσμιας αγοράς το 2019 και αναμένεται ταχεία διείσδυσή τους τα επόμενα χρόνια απόρροια της ταχείας διείσδυσης της ηλεκτροκίνησης. Μάλιστα, σύμφωνα με μελέτες, οι μπαταρίες λιθίου ιόντων αναμένεται να ξεπεράσουν σε διείσδυση τις μπαταρίες μόλυβδου οξέος (Grand View Research, 2022).

Ο συνδυασμός χωρητικότητας, μεγέθους, απόδοσης και κόστους αγοράς και εγκατάστασης των μπαταριών μόλυβδου οξέος και λιθίου ιόντων είναι ο κύριος λόγος για τη μεγαλύτερη διείσδυσή τους παγκοσμίως. Σύμφωνα με τους Yang et al. (2018), οι μπαταρίες λιθίου ιόντων κυριαρχούν στα συστήματα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά και στις εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.



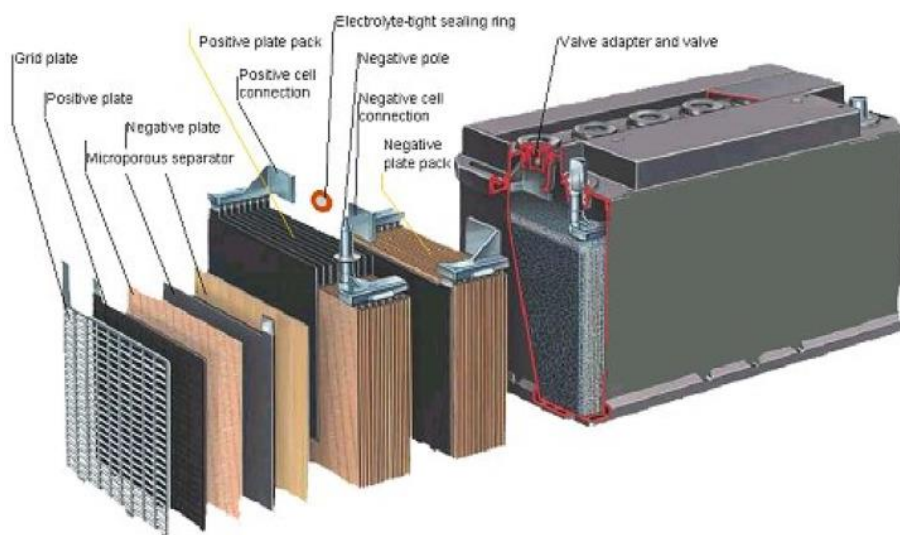
Γράφημα 11: Μερίδια αγοράς διαφορετικών τύπων μπαταριών (Yanamandra, Pinisetty, Daoud, & Gupta, 2022)

Ενδεικτικά, στις ΗΠΑ, μπαταρίες λιθίου ιόντων χρησιμοποιούνται στο 77% των εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ακολουθούν οι μπαταρίες μόλυβδου οξέος δεύτερες κατά σειρά εφαρμογής (Yang, Bremner, Menictas, & Kay, 2018). Παρακάτω αναλύονται οι μπαταρίες λιθίου ιόντων και οι μπαταρίες μόλυβδου οξέος, καθώς αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά μπαταριών.

Πίνακας 1: Σύγκριση μπαταριών μόλυβδου οξέος και λιθίου ιόντων (Yanamandra, Pinisetty, Daoud, & Gupta, 2022)

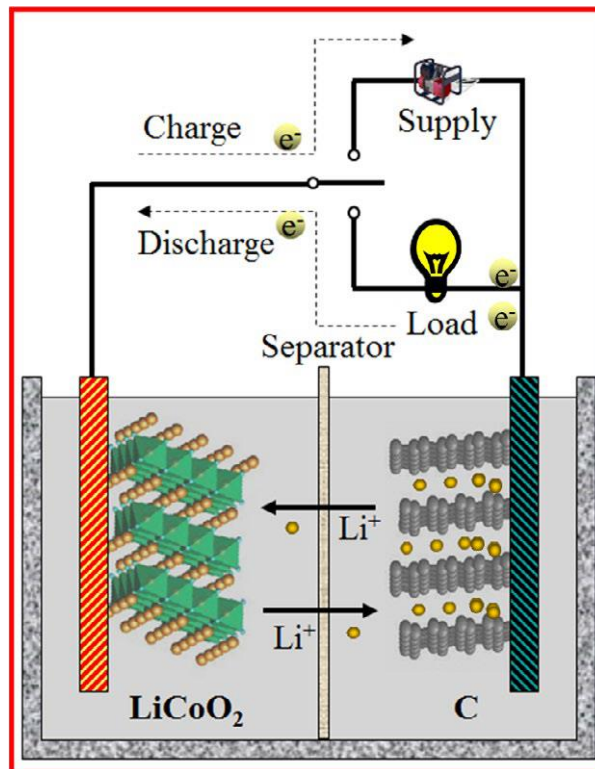
Στοιχεία	Μπαταρίες μόλυβδου οξέος	Μπαταρίες λιθίου ιόντων
Βάθος εκφόρτισης	~30–50%	~80–95%
Διάρκεια ζωής – κύκλοι φόρτισης - εκφόρτισης	~500–1000 κύκλοι φόρτισης - εκφόρτισης	~4000–5000 κύκλοι φόρτισης - εκφόρτισης
Βαθμός απόδοσης	~78–85%	~92–98%
Υποβάθμιση χωρητικότητας σε γρήγορη εκφόρτιση	~40%	0%
Ταχύτητα φόρτισης	Πιο αργή	Πιο γρήγορη
Μέγεθος και βάρος	Ογκώδεις	Συμπαγείς
Αυτοεκφόρτιση	~15%	0%
Απόδοση εκφόρτισης ανά λεπτό	~70% της χωρητικότητας στους 40°C	~98% της χωρητικότητας στους 40°C
Υποβάθμιση χωρητικότητας	~30% της χωρητικότητας στους 20°C	~80% της χωρητικότητας στους 20°C
Κόστος αγοράς και εγκατάστασης	Χαμηλό	Υψηλό
Ανακυκλωσιμότητα	~99%	~5%

Οι μπαταρίες μολυβδου οξέος χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε εφαρμογές εκκίνησης, φωτισμού, σε εγκαταστάσεις κίνησης, σε εφεδρικά συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας, σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά και υβριδικά συστήματα και γενικά σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μπαταρίες μολυβδου οξέος όπως προαναφέρεται αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, ένα ηλεκτρόδιο ανόδου και ένα ηλεκτρόδιο καθόδου. Το ηλεκτρόδιο ανόδου συνήθως κατασκευάζεται από διοξείδιο του μολυβδου (PbO_2), ενώ το ηλεκτρόδιο καθόδου συνήθως κατασκευάζεται από μολυβδο (Pb). Τα δύο αυτά ηλεκτρόδια βρίσκονται σε ένα κλειστό δοχείο, το οποίο πληρώνεται από έναν ηλεκτρολύτη, συνήθως αραιωμένο διάλυμα H_2SO_4 . Στις μπαταρίες μολυβδου οξέος ο ηλεκτρολύτης μπορεί να βρίσκεται σε υγρή μορφή, οπότε αναφέρονται οι πλημμυρισμένες μπαταρίες μολυβδου οξέος, είτε σε μορφή gel, οπότε αναφέρονται οι σφραγισμένες μπαταρίες μολυβδου οξέος ρυθμιζόμενης βαλβίδας.



Εικόνα 9: Δομή μπαταρίας λιθίου ιόντων (Zohuri, 2022)

Οι μπαταρίες λιθίου ιόντων κατασκευάζονται από ηλεκτρικά στοιχεία ιόντων λιθίου τα οποία συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα ή σε σειρά ή παράλληλα και σειρά, ανάλογα με το εκάστοτε ονομαστικό ρεύμα και την εκάστοτε ονομαστική τάση της μπαταρίας. Συνήθως, οι μπαταρίες λιθίου ιόντων έχουν μεγάλη χωρητικότητα και για το λόγο κατασκευάζονται από επιμέρους χιλιάδες στοιχεία. Κάθε ηλεκτρικό στοιχείο λιθίου ιόντων αποτελείται από ένα αρνητικό και από ένα θετικό ηλεκτρόδιο, τα οποία εμβαπτίζονται σε ένα δοχείο το οποίο γεμίζει με έναν ειδικό ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, τα ηλεκτρόδια απομονώνονται μεταξύ τους με έναν διαχωριστή, συνήθως κατασκευασμένο από μικροπορώδη μεμβράνη, ο οποίος επιτρέπει την ανταλλαγή ιόντων αλλά όχι την κίνηση ηλεκτρονίων ανάμεσα στο θετικό και στο αρνητικό ηλεκτρόδιο.



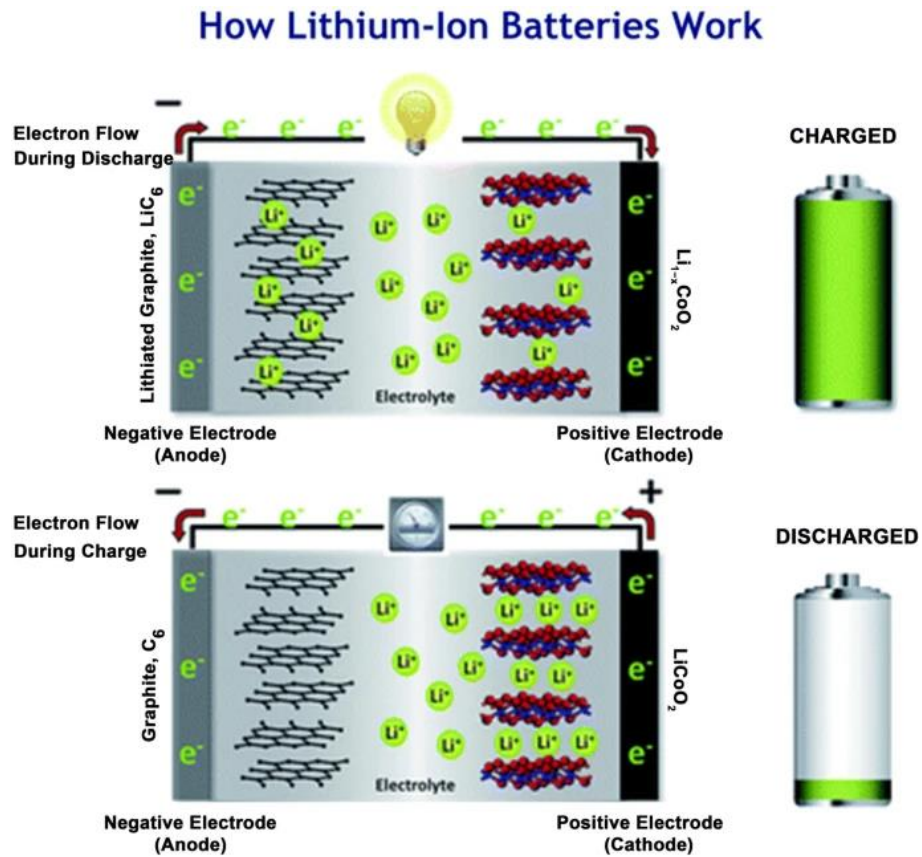
Εικόνα 10: Τυπική δομή μίας μπαταρίας λιθίου ιόντων (Deng, 2015)

Τα ηλεκτρικά στοιχεία - κυψέλες κατά την κατασκευή των μπαταριών λιθίου ιόντων είναι εκφορτισμένα, καθώς τόσο τα υλικά για τα ηλεκτρόδια καθόδου, όπως τα LiCoO_2 και LiFePO_4 , όσο και τα υλικά για τα ηλεκτρόδια ανόδου, είναι σταθερά στον ατμοσφαιρικό αέρα και δεν γίνεται ανταλλαγή ιόντων. Η αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζονται οι μπαταρίες λιθίου ιόντων είναι η παρακάτω:



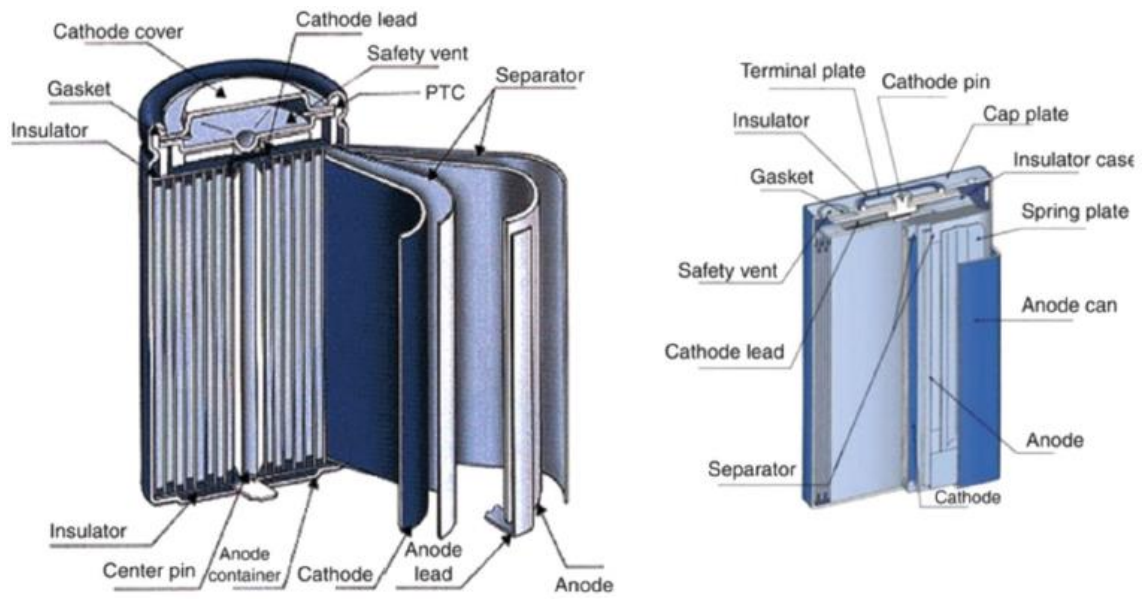
Μια τυπική μπαταρία ιόντων λιθίου αποτελείται από μέταλλα όπως κοβάλτιο, λίθιο, χαλκός, αλουμίνιο, σίδηρος και νικέλιο, άλλες οργανικές χημικές ουσίες και πλαστικό. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης, τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται σε μια εξωτερική ηλεκτρική πηγή. Τα ηλεκτρόνια αναγκάζονται να απελευθερωθούν στην κάθοδο και να κινηθούν εξωτερικά, μέσω της πηγής - φορτίου προς την άνοδο. Ταυτόχρονα τα ιόντα λιθίου κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, αλλά εσωτερικά, από την κάθοδο στην άνοδο μέσω του ηλεκτρολύτη. Με αυτόν τον τρόπο η εξωτερική ενέργεια αποθηκεύεται ηλεκτροχημικά στην μπαταρία με τη μορφή χημικής ενέργειας στο θετικό και στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο τάσης - δυναμικό. Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκφόρτισης, όπου τα ηλεκτρόνια κινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο

μέσω ενός εξωτερικού φορτίου – πηγής και τα ιόντα λιθίου κινούνται από την άνοδο προς στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη (Zohuri, 2022).



Εικόνα 11: Φόρτιση και εκφόρτιση μπαταρίας λιθίου ιόντων (Chen, et al., 2020)

Παρακάτω εξετάζεται περαιτέρω η δομή και τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μπαταριών λιθίου ιόντων:



Εικόνα 12: Δομή και επιμέρους μέρη μπαταριών λιθίου ιόντων (Yanamandra, Pinisetty, Daoud, & Gupta, 2022)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΑΠΕ

4.1 Βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου

Το ηλεκτρικό δίκτυο ή αλλιώς το ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη (Λαμπρίδης, Ντοκόπουλος, & Γ., 2006). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από διάφορες μορφές ενέργειας, σε διαφορετικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, οι οποίες εντάσσονται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τη ζήτηση ενέργειας. Το ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από το διασυνδεδεμένο και το μη-διασυνδεδεμένο δίκτυο. Στο διασυνδεδεμένο δίκτυο ανήκει όλη η ηπειρωτική Ελλάδα, η Εύβοια, τα νησιά του Ιονίου Πελάγους και προσφάτως η Κρήτη, ενώ στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο ανήκουν τα περισσότερα νησιά του Αιγαίου. Στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται ως επί το πλείστο σε μονάδες που καίνε πετρέλαιο και δευτερευόντως σε μονάδες ΑΠΕ.

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα γίνεται στα πεδία της Κοζάνης (Καρδιά Αγ. Δημητρίου και της Μεγαλόπολης), με θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ, ανά την επικράτεια με υδροηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ και ιδιωτών, με αιολικούς σταθμούς, φωτοβολταϊκούς σταθμούς και σταθμούς άλλων τεχνολογιών ιδιωτών.

- Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από γραμμές υψηλής τάσης, στα 66kV και στα 150kV, και υπερυψηλής τάσης, στα 400kV. Οι γραμμές αυτές διατρέχουν το σύνολο της ηπειρωτικής Ελλάδας, μεταφέροντας την παραγόμενη ενέργεια από τα κύρια ενεργειακά πεδία της Κοζάνης και της Αρκαδίας, όπως αυτά προαναφέρονται. Επιπλέον, το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει και υποσταθμούς μεταφοράς, υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής τάσης στη μέση τάση, για τη διασύνδεση του συστήματος μεταφοράς με το σύστημα διανομής, υποσταθμούς ανύψωσης μέσης τάσης στην υψηλή τάση για τη διασύνδεση σταθμών παραγωγής ενέργειας και μονάδων ΑΠΕ ιδιωτών και της ΔΕΗ (ΑΔΜΗΕ, 2023).



Εικόνα 7: Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΔΜΗΕ, 2023)

- Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τους υποσταθμούς διανομής, όπου η μέση τάση υποβιβάζεται στη χαμηλή τάση, και από τις γραμμές διανομής. Σκοπός του συστήματος διανομής είναι η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από το σύστημα μεταφοράς, και συγκεκριμένα από τα κέντρα υψηλής τάσης στους καταναλωτές. Σημειώνεται ότι η ενέργεια διανέμεται τόσο με γραμμές χαμηλής τάσης όσο και με γραμμές μέσης τάσης, ανάλογα με τη συμφωνημένη ισχύ των καταναλωτών (ΡΑΕ, 2023α).

- Καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας

Στο ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας οι καταναλωτές διακρίνονται ανάλογα με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και ανάλογα με το επίπεδο τάσης με το οποίο τροφοδοτούνται. Ως εκ τούτου, οι καταναλωτές διακρίνονται σε οικιακούς και σε επαγγελματικούς καταναλωτές, οι οποίοι τροφοδοτούνται από το δίκτυο διανομής με γραμμές

στη Χαμηλή Τάση και σε βιομηχανικούς καταναλωτές, οι οποίοι τροφοδοτούνται από το δίκτυο διανομής με γραμμές στη Μέση Τάση. Επιπλέον, στο ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι συνδεδεμένοι και μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές οι οποίοι τροφοδοτούνται από το σύστημα μεταφοράς με γραμμές στην Υψηλή Τάση ή στην Υπερυψηλή Τάση, οι οποίοι διαθέτουν ιδιωτικά κέντρα υψηλής τάσης – υποσταθμούς υψηλής τάσης. Τέτοιοι καταναλωτές είναι εργοστάσια του ομίλου TITAN, Αλουμίνιον της Ελλάδας και Βιοχάλκο (ΑΔΜΗΕ, 2023).

4.2 Διασυνδεδεμένα (on-grid) συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα διασυνδεδεμένα (on-grid) με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν ηλεκτρική DC ενέργεια από φωτοβολταϊκά πάνελ, η οποία ενέργεια μετατρέπεται μέσω αντιστροφών σε AC ενέργεια και κατόπιν διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή στο τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στο τοπικό δίκτυο η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να καταναλώνεται ή να αποθηκεύεται σε διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας για να καταναλωθεί αργότερα. Η δε ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί είτε να πωλείται είτε να απορροφάται ετεροχρονισμένα για την κάλυψη ιδιοκαταναλώσεων. Εντοπίζονται δύο κύριοι τύποι διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων με δύο υποπαραλλαγές.

Το πλέον διαδεδομένο διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι το ονομαζόμενο FIT ή feed-in-tariff, όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο και πωλείται σε παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας. Η ονομασία του προκύπτει από το γεγονός ότι προ της σύνδεσης του φωτοβολταϊκού συστήματος συμφωνείται μία ταρίφα πώλησης της ενέργειας, η οποία συνήθως αναφέρεται σε €/MWh (Pyrgou, Kylili, & Fokaides, 2016). Σύμφωνα με την Πύργου et al. (2016), οι επενδύσεις σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα ταρίφας μολονότι φαντάζουν να έχουν πολύ μικρό επιχειρηματικό κίνδυνο εντούτοις η κρίση των προηγούμενων ετών, όπου συμβασιολογημένες τιμές πώλησης άλλαξαν βίαια στον ευρωπαϊκό νότο προκάλεσε αναστάτωση. Ωστόσο, διαφαίνεται ότι η σύναψη νέων συμβάσεων όπου συμπεριλαμβάνονται ρητοί όροι για πιθανές υπαναχωρήσεις των αγοραστών της παραγόμενης ενέργειας δημιουργούν ένα τοπίο στο οποίο τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα ταρίφας μπορούν να αναπτυχθούν. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, απόρροια της ταχείας διεύθυνσης διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων και άλλων μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, νέες προκλήσεις προέκυψαν (Leiren & Reimer, 2020). Καθώς τα δίκτυα έφτασαν ή πλησίασαν στον κορεσμό, και ελλείπει επενδύσεων για την ενίσχυση των δικτύων

μεταφοράς και διανομής, οι διαχειριστές δικτύων ξεκίνησαν να αποκόπτουν παραγωγές σε ώρες αιχμής, καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα απορρόφησής τους από το δίκτυο (Mitchell & Nagrial, 2019). Επιπλέον, καθώς καθιερώθηκε η δημιουργία αγοράς ενέργειας, υιοθετώντας τις αρχές των χρηματιστηριακών αγορών, όπου δηλαδή οι παραγωγοί ενέργειας μειοδοτούν ώστε να βρουν αγοραστές ενέργειας, με την τιμή της ενέργειας να μεταβάλλεται διαρκώς, προέκυψε η ευκαιρία πώλησης ακριβής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής ή κατά τις ώρες όπου η παραγόμενη πράσινη ενέργεια δεν μπορεί να καλύψει τη ζήτηση (Huang, Nie, Lin, Wang, & Dong, 2020). Προκειμένου να αξιοποιηθεί η ευκαιρία αυτή, εντάθηκε το ενδιαφέρον για διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα με διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτά τα συστήματα, η ενέργεια που παράγεται κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης ή μεγάλης προσφοράς μπορεί να αποθηκεύεται έτσι ώστε να διοχετευθεί στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής ή μικρής προσφοράς. Με τον τρόπο αυτό οι παραγωγοί ενέργειας μπορούν να πωλούν την παραγόμενη ενέργειά τους σε υψηλότερες τιμές (Tushar, et al., 2020). Παράλληλα, με την ενσωμάτωση διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας στα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα ταρίφας ενισχύεται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα βελτιώνεται η σταθερότητά του, η αξιοπιστία του αλλά και η ίδια η ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας (Das, και συν., 2019). Καθώς ενσωματώνονται περισσότερες φωτοβολταϊκές μονάδες με διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), αλλάζει η δομή του ΣΗΕ, το οποίο αποκεντρώνεται, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ευστάθεια και αξιοπιστία του, με την ενσωμάτωση μπαταριών και σε άλλες μονάδες παραγωγής ενέργειας να επιφέρει αντίστοιχα οφέλη. Ωστόσο, το σημαντικό πλεονέκτημα των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η δυνατότητα εγκατάστασής τους στην ύπαιθρο, όπου τα συστήματα αυτά μπορούν μέσω της διασποράς τους να συνεισφέρουν στη μετάβαση σε ΣΗΕ βασισμένα στη διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας, κομίζοντας οφέλη τόσο για το δίκτυο όσο και για τους καταναλωτές (Shafiullah, Ahmed, & Al-Sulaiman, 2022).

Ως εκ τούτου, τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα με ταρίφα (feed-in-tariff) διακρίνονται σε συστήματα με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και χωρίς μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου και τη δομή της αγοράς ενέργειας, τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να αποδίδουν καλύτερα οικονομικά και τεχνικά (Obi & Bass, 2016).

Επιπλέον, υπάρχει ακόμη μία κατηγορία διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού ή net metering. Ο σκοπός των συστημάτων αυτών δεν είναι η πώληση της παραγόμενης ενέργειας, αλλά ο συμψηφισμός της με τις ιδιοκαταναλώσεις

του παραγωγού. Ως εκ τούτου, εισάγεται ο όρος αυτοπαραγωγός, προκειμένου να περιγραφεί ο καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος παράγει ο ίδιος ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψει τις καταναλώσεις του (Poullikkas, Kourtis, & Hadjipaschalis, 2013). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα, καθώς μπορούν να εγκαθίστανται εύκολα σε κατοικίες, χωρίς να απαιτείται να καταληφθεί μεγάλη επιφάνεια εγκατάστασης. Καθώς η παραγόμενη ενέργεια συμψηφίζεται με τις καταναλώσεις, η συνεισφορά τους στη μείωση του κόστους προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι καθοριστική, όχι υπό τη σκοπιά του μηδενισμού της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, αλλά από τη σκοπιά της δραστηκής μείωσης της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, ειδικά κατά τις ώρες αιχμής, αλλά και από τη σκοπιά της μείωσης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, προκειμένου οι αυτοπαραγωγοί να χρεώνονται βάσει της χαμηλότερης κλίμακας χρέωσης, καθώς στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες εφαρμόζονται τιμολογιακές πολιτικές με κλίμακες, ώστε οι μεγαλύτερες καταναλώσεις να χρεώνονται περισσότερο από τις μικρότερες καταναλώσεις (Nwaigwe, Mutabilwa, & Dintwa, 2019).

Πρόκειται για φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία τροφοδοτούν τις ιδιοκαταναλώσεις μίας ηλεκτρικής εγκατάστασης. Κατά τα διαστήματα όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το φωτοβολταϊκό επαρκεί για να καλύψει τις καταναλώσεις της εγκατάστασης, τότε δεν καταναλώνεται ενέργεια από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τα διαστήματα όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν επαρκεί για να καλύψει τις καταναλώσεις της εγκατάστασης, τότε καταναλώνεται ενέργεια από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να καλυφθεί το αρνητικό ισοζύγιο παραγωγής – κατανάλωσης. Κατά τα διαστήματα όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πλεονάζει έναντι των καταναλώσεων της εγκατάστασης, τότε η περίσσεια ενέργειας εγχέεται στο δίκτυο και μπορεί να καταναλωθεί ετεροχρονισμένα κατά τα διαστήματα όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν επαρκεί για να καλύψει τις καταναλώσεις της εγκατάστασης. Η μέτρηση της ροής της ενέργειας γίνεται με δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας, με τον πρώτο εκ των οποίων μετρά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και με το δεύτερο εκ των οποίων να μετρά τη ροή προς και από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όπου ο δεύτερος μετρητής είναι διπλής ροής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αυτοπαραγωγοί δε χρεώνονται για την παραγωγή ετεροχρονισμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας την οποία διοχέτευσαν στο δίκτυο, ωστόσο χρεώνονται για τη μεταφορά και διανομή της, καθώς χρησιμοποιούν το δίκτυο ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Ως εκ τούτου, τα φωτοβολταϊκά συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού τείνουν να αποδίδουν καλύτερα οικονομικά και τεχνικά όταν η παραγωγή ταυτοχρονίζεται με την κατανάλωση της

ηλεκτρικής ενέργειας. Υπό την οικονομική σκοπιά, ελαχιστοποιούνται οι χρεώσεις μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που εγχύθηκε στο δίκτυο και καταναλώθηκε ετεροχρονισμένα, ενώ υπό την τεχνική σκοπιά ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας λόγω μεταφοράς της από τον αυτοπαραγωγό στο δίκτυο και από το δίκτυο πίσω στον αυτοπαραγωγό (Ziras, Calearo, & Marinelli, 2021).

Στην κατεύθυνση ελαχιστοποίησης των αρνητικών επιπτώσεων της ετεροχρονισμένης παραγωγής και κατανάλωσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, εντάθηκε το ενδιαφέρον για διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού με μπαταρίες, προκειμένου οι περίσσειες της παραγόμενης ενέργειας να αποθηκεύονται τοπικά, προκειμένου να καταναλωθούν όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του αυτοπαραγωγού. Τα οφέλη από αυτά τα συστήματα είναι τόσο οικονομικά, αν και το κόστος αγοράς και εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων είναι σαφώς μεγαλύτερο από ό,τι για συστήματα χωρίς μπαταρίες, όσο και τεχνικό καθώς μειώνονται δραστικά οι απώλειες ισχύος (Kumar, Malik, & Garg, 2022).

4.3 Αυτόνομα (off-grid) συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα αυτόνομα (autonomous) ή εκτός δικτύου (off-grid) φωτοβολταϊκά συστήματα είναι φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία συνήθως εγκαθίστανται για την κάλυψη ιδιοκαταναλώσεων σε τόπους οι οποίοι βρίσκονται σε σημεία μακριά από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όπως απομακρυσμένες εξοχικές οικίες, π.χ. σε ορεινούς όγκους, ή σε κινητές εγκαταστάσεις, όπως τροχόσπιτα.

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν ως μικροδίκτυο (microgrid), εντός του οποίου γίνεται παραγωγή, αποθήκευση και διανομή ενέργειας, προκειμένου να καλυφθούν φορτία ιδιοκαταναλώσεων. Συνεπώς, με εξαίρεση την προσθήκη διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας και εξοπλισμού για τη φόρτιση (ρυθμιστές φόρτισης) των μπαταριών, τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από όμοιο εξοπλισμό με τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα. Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνισή τους υβριδικοί μετατροπείς ενέργειας, οι οποίοι λειτουργούν ταυτόχρονα και ως ρυθμιστές φόρτισης των μπαταριών, ειδικά για την κατασκευή αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγάλης ισχύος. Ωστόσο, ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, inverter, μπαταρίες και ρυθμιστή ή ρυθμιστές φόρτισης (Ali, Farooq, Rehman, Awais, Jamil, & Noman, 2018).

Σε ό,τι αφορά στη μελέτη των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, η μελέτη και ο σχεδιασμός τους βασίζεται στη λεπτομερή καταγραφή της εγκατεστημένης ισχύος των ιδιοκαταναλώσεων, προκειμένου να καταστεί εφικτός ο σχεδιασμός της καμπύλης φορτίου, την οποία καλείται να καλύψει ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Κατόπιν, υπολογίζεται η απαιτούμενη παραγόμενη ισχύς ανά ημέρα ή εβδομάδα, μήνα ή έτος και βάσει των κλιματικών δεδομένων πραγματοποιείται υπολογισμός ή προσομοίωση ώστε να ευρεθεί η απαραίτητη ισχύς που πρέπει να εγκατασταθεί. Ιδιαίτερα, σε ό,τι αφορά στη μελέτη για τη διαστασιολόγηση της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας, αυτή βασίζεται στον ορισμό της απαιτούμενης αυτονομίας του συστήματος, δηλαδή της διάρκειας που μπορεί να τροφοδοτούνται οι ιδιοκαταναλώσεις απουσία παραγωγής ενέργειας (π.χ. σε περιόδους κακοκαιρίας και παρατεταμένης νέφωσης). Στη βάση αυτή υπολογίζεται η απαιτούμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ, αλλά και διαστασιολογείται η διάταξη ρύθμισης της φόρτισης της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας. Αξίζει περαιτέρω να σημειωθεί ότι η ισχύς του inverter στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να είναι επαρκής όχι για να μετατρέπει την παραγόμενη DC ενέργεια, αλλά για να καλύψει την τροφοδοσία του μέγιστου φορτίου της εγκατάστασης. Ως εκ τούτου, οι inverter σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα διαστασιολογούνται ώστε να καλύπτουν την εγκατεστημένη ισχύ των ιδιοκαταναλώσεων, ενώ οι ρυθμιστές φόρτισης διαστασιολογούνται ώστε να μπορούν να διοχετεύουν την παραγόμενη DC ενέργεια στη διάταξη αποθήκευσης ενέργειας (Ali, Farooq, Rehman, Awais, Jamil, & Noman, 2018).

Εκτός από τα παραδοσιακά αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, εντοπίζεται μεγάλο ενδιαφέρον για αυτόνομα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία ενσωματώνουν ακόμη μία πηγή ενέργειας. Για παράδειγμα, εντοπίζονται αυτόνομα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα με κάποια μικρής ισχύος ανεμογεννήτρια ή με κάποια μικρής ισχύος ηλεκτρογεννήτρια. Η δεύτερη πηγή ισχύος εξυπηρετεί τα φορτία ιδιοκαταναλώσεων κατά τη διάρκεια της νύχτας και κατά τη διάρκεια περιόδων με νεφώσεις ή με κακοκαιρία. Τα υβριδικά αυτόνομα συστήματα είναι περισσότερο αξιόπιστα από τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς η δευτερεύουσα πηγή ενέργειας μπορεί όχι μόνον να παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν παράγει ενέργεια, αλλά και να φορτίζει τις μπαταρίες όταν αυτές πλησιάσουν σε χαμηλό επίπεδο φόρτισης, αλλά και για να παρέχει άμεσα ισχύ για την τροφοδότηση μεγάλων φορτίων (π.χ. εργαλείων χειρός) τα οποία είναι επιζήμιο να τροφοδοτηθούν απευθείας από τις μπαταρίες ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Καθώς η λειτουργία φορτίων με μεγάλη ισχύ απαιτεί την ταχεία εκφόρτιση των μπαταριών,

αυξάνεται η θερμοκρασία των μπαταριών με αποτέλεσμα να γερνούν πρόωρα, ενώ παράλληλα περιορίζεται δραστικά η ωφέλιμη χωρητικότητά τους, καθώς η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών αφορά συνήθως σε εκφόρτιση σε 100 λεπτά (C100) ή σε 10 λεπτά (C10) (Al-Falahi, Jayasinghe, & Enshaei, 2017).

4.4 Το θεσμικό πλαίσιο και η ισχύουσα νομοθεσία

Παρακάτω συνοψίζουν τα κυριότερα ορόσημα του θεσμικού πλαισίου το οποίο διέπει τα φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα.

Το 2006 καθορίστηκαν για πρώτη φορά τιμές πώλησης της παραγόμενης από φωτοβολταϊκά ενέργειας (feed-in-tariffs), με το Ν. 3468/2006. Το 2009, ξεκίνησε ένα πρόγραμμα ανάπτυξης μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις με ορίζοντα ολοκλήρωσης το 2019, με την ΚΥΑ 12323/2009. Το 2010, με το Ν.3851/2010 απλοποιήθηκαν οι αδειοδοτικές διαδικασίες για την κατασκευή και σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων, οδηγώντας στη ραγδαία ανάπτυξη της αγοράς τη διετία 2012 – 2013, όπως αναφέρεται παρακάτω στην παράγραφο 5.2. Το 2013, ο Ν.4223/2013 σηματοδότησε την έναρξη της ύφεσης της αγοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων στη χώρα, καθώς ανεστάλη η αδειοδοτική διαδικασία, απόρροια του κορεσμού του δικτύου και μεγάλων ελλειμμάτων του ταμείου που αποζημίωνε τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, απόρροια κακού σχεδιασμού και οικονομικών ατασθαλιών. Το 2015, με την ΥΑ 24461/2015 εισήχθη στην ελληνική νομοθεσία ο όρος «ενεργειακός συμψηφισμός» και καθορίστηκαν οι όροι και οι προϋποθέσεις για τη σύνδεση και λειτουργία φωτοβολταϊκών σταθμών με καθεστώς ενεργειακού συμψηφισμού. Το 2016 ξεκίνησε η εξυγίανση της αδειοδότησης φωτοβολταϊκών συστημάτων ταρίφας, με το Ν.4414/2016, με τον οποίο υιοθετήθηκαν διαδικασίες διαγωνισμού για τα έργα φωτοβολταϊκών. Ουσιαστικά ξεκίνησε η περίοδος όπου για δεδομένο «χώρο» στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λάμβαναν άδεια παραγωγού οι παραγωγοί που μειοδοτούσαν στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2018, με το Ν.4513/2018 καθορίστηκαν οι όροι και οι προϋποθέσεις για τη δημιουργία Ενεργειακών Κοινοτήτων, ενεργοποιώντας το ενδιαφέρον μεγάλης ομάδας επενδυτών οι οποίοι συνεταιρίστηκαν για τη δημιουργία ενεργειακών κοινοτήτων, ώστε με μικρότερο κόστος να έχουν μερίδιο από μεγαλύτερης ισχύος φωτοβολταϊκά συστήματα. Το 2020, με το Ν.4685/2020 ξεκίνησε η πρώτη φάση εκ νέου απλοποίησης των αδειοδοτικών διαδικασιών, με υιοθέτηση και ψηφιακών διαδικασιών αδειοδότησης και με τη λήψη δέσμευσης για το διαχειριστή του δικτύου και για τη ΡΑΕ προκειμένου να εξυπηρετούν τα αιτήματα των επενδυτών για έκδοση αδειών και για σύνδεση ολοκληρωμένων έργων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Το νόμο αυτό ουσιαστικά

επανεκκίνησε η αγορά των φωτοβολταϊκών στη χώρα, όπως αποτυπώνεται παρακάτω στην παράγραφο 5.2. Με το Ν.4951/2022, με τον οποίο μόλις πέρυσι πραγματοποιήθηκε η δεύτερη φάση απλοποίησης των αδειοδοτικών διαδικασιών και για πρώτη φορά δημιουργήθηκε το απαραίτητο ρυθμιστικό πλαίσιο για την κατασκευή και σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων με ενσωματωμένη αποθήκευση ενέργειας. Στο ίδιο πλαίσιο εντάχθηκαν μεταξύ άλλων τα φωτοβολταϊκά συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού με ενσωματωμένη αποθήκευση ενέργειας και με μηδενική έγχυση ενέργειας στο δίκτυο, ως λύση στο πρόβλημα του κορεσμού του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα ταρίφας με ενσωματωμένη αποθήκευση ενέργειας, στα οποία ωστόσο σύμφωνα με το άρθρο 10 του ίδιου νόμου δεν επιτρέπεται η φόρτιση των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας από το δίκτυο. Η αποθηκευμένη ενέργεια προβλέπεται ότι μπορεί να διοχετεύεται στο δίκτυο σε ώρες αιχμής, οπότε αλλάζει και η οριακή τιμή συστήματος, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και ταυτόχρονα να βελτιώνεται η απόδοση των επενδύσεων. Το πιο πρόσφατο ορόσημο στο θεσμικό πλαίσιο το οποίο διέπει τα φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα είναι ο Ν.5037/2023 με τον οποίο τέθηκαν όρια για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού, θεσμοθετήθηκε για πρώτη φορά το net-billing, όπου οι περίσσεια ενέργειας πωλείται στον προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας και θεσπίστηκε η αυτοκατανάλωση από κοινού, ανοίγοντας το δρόμο για φωτοβολταϊκά συστήματα σε πολυκατοικίες.

4.5 Διαδικασίες υποβολής επενδυτικών σχεδίων

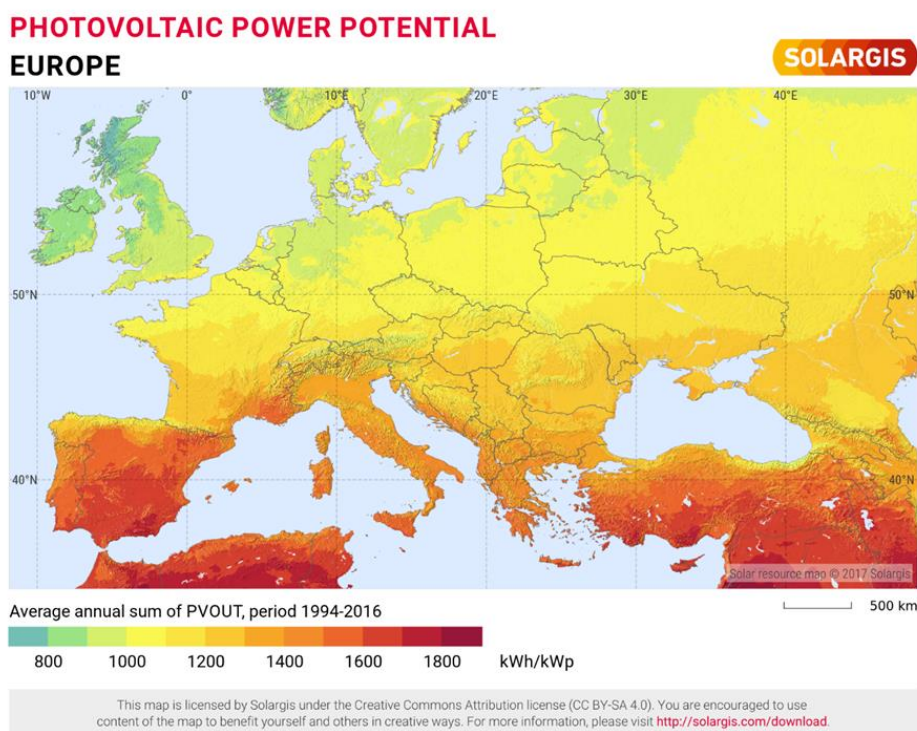
Για φωτοβολταϊκά συστήματα ταρίφας ισχύος έως 500kWp δεν απαιτείται συμμετοχή σε διαγωνιστική διαδικασία, ενώ παράλληλα το Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος διεξάγει διαγωνιστικές διαδικασίες για έργα μεγαλύτερης ισχύος. Ειδικά για έργα ισχύος άνω των 500kWp απαιτείται η εκπόνηση μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, προκειμένου να ληφθεί άδεια από τη ΡΑΕ, εφόσον ο παραγωγός έχει λάβει τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Μετά τη λήψη άδειας παραγωγού, οι επενδυτές πρέπει να αιτούνται τη λήψη προσφοράς σύνδεσης στο δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ και κατόπιν να προβαίνουν σε υπογραφή της σύμβασης σύνδεσης. Σε περίπτωση όπου οι επενδυτές επιθυμούν να πουλούν την παραγόμενη ενέργεια σε ιδιώτες προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας, τότε δεν υπάγονται σε διαγωνιστικές διαδικασίες, αλλά συμφωνούν την τιμή πώλησης ιδιωτικά. Κατόπιν ολοκλήρωσης των έργων, ο ΔΕΔΔΗΕ είναι υπεύθυνος για τη διασύνδεση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο δίκτυο διανομής, κυρίως στη Μέση Τάση. Μεγάλο μέρος των διαδικασιών, όπως η λήψη άδειας από την οικεία Πολεοδομία και η σύμβαση σύνδεσης με το ΔΕΔΔΗΕ πραγματοποιούνται πλέον ηλεκτρονικά, όπως ηλεκτρονικά πραγματοποιούνται και όλες οι διαγωνιστικές διαδικασίες.

Ωστόσο, καθώς για φωτοβολταϊκά συστήματα ταρίφας δεν έχουν νομοθετηθεί χρονικά όρια εντός των οποίων πρέπει οι αιτούντες να εξυπηρετούνται, εντούτοις απαιτείται περαιτέρω εκσυγχρονισμός του πλαισίου που διέπει την αδειοδότηση και σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων (ΡΑΕ, 2023γ).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΠΕ

5.1 Η παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα εντοπίζεται υψηλότερη ηλιακό δυναμικό σε σχέση με τις περισσότερες χώρες της Ευρώπης, το οποίο οφείλεται στο γεωγραφικό πλάτος της χώρας. Εξαιρέση αποτελεί η Ισπανία, η Πορτογαλία και τμήματα της Ιταλίας, όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη ηλιακού δυναμικού:



Εικόνα 8: Ηλιακό δυναμικό στην Ευρώπη (Solargis, 2019)

Εκτός από το αυξημένο ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα, οι Loumakis et al. (2019) προτείνουν ότι άλλοι λόγοι που συνετέλεσαν στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα περιλαμβάνουν τις κρατικές παρεμβάσεις και επιδοτήσεις, στα πλαίσια εκπλήρωσης υποχρεώσεων της χώρας προς την Ε.Ε.. Οι παρεμβάσεις αυτές ενέργησαν θετικά όχι μόνον σε θέματα επιδότησης της κατασκευής φωτοβολταϊκών συστημάτων αλλά και σε θέματα επιδότησης της τιμής των πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Loumakis, Giannini, & Maroulis, 2019).

Αντίστροφα, αξίζει να αναφερθεί ότι η παλαιότητα του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και ο μεγάλος κορεσμός του ενεργούν αρνητικά στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων

πηγών ενέργειας στην Ελλάδα, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών σταθμών και των αιολικών πάρκων.

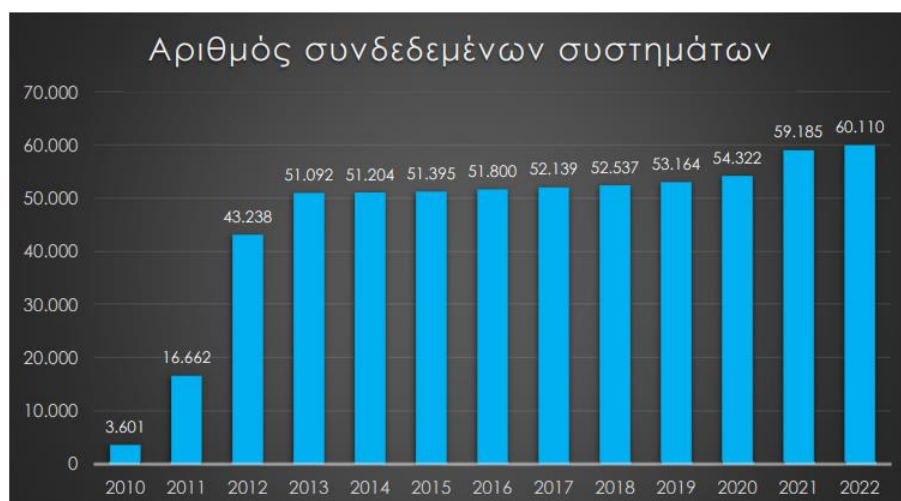
5.2 Μελέτη εγχώριων φωτοβολταϊκών πάρκων σε λειτουργία

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη έκθεση του Συνδέσμου Εταιριών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ), η οποία δημοσιεύθηκε το Νοέμβριο του 2022, το 2022 αναμένεται να έχουν συνδεθεί φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος 1.340MW ή 1,34GW, ενώ από το 2010 μέχρι και το τέλος του 2021 είχαν συνδεθεί στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας φωτοβολταϊκά συστήματα συνολικής ισχύος 4,126GW. Παρατηρείται σημαντική επιβράδυνση στην αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από το 2014 έως το 2018, με την αγορά να επανεκκινεί ουσιαστικά από το 2019 με την προσθήκη 161MW φωτοβολταϊκών συστημάτων.



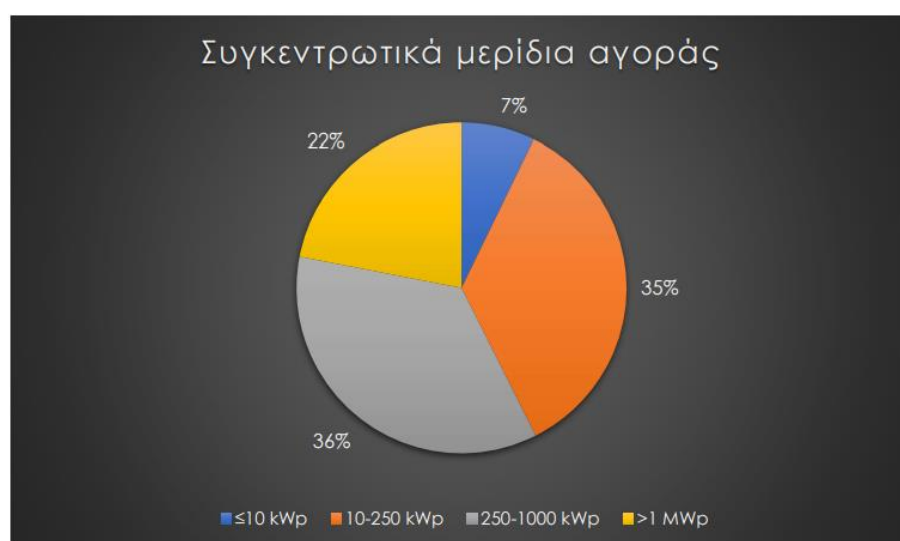
Γράφημα 4: Ετήσια και συνολική συνδεδεμένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022)

Σύμφωνα με το Σύνδεσμο Εταιριών Φωτοβολταϊκών, τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν την πλέον δημοκρατική και την πιο αποκεντρωμένη ενεργειακή τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτό φαίνεται και από το μεγάλο πλήθος των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επιπρόσθετα, σημειώνεται ότι τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα συνδέθηκαν το 2010, συγκεκριμένα περί τα 27.000 συστήματα, ενώ επιβράδυνση στην ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων παρατηρείται σε όρους πλήθους συνδεδεμένων συστημάτων από το 2014 έως και το τέλος του 2018.



Γράφημα 5: Αριθμός συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022)

Όπως φαίνεται παρακάτω, **(Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.)**, η πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ήτοι το 36% αυτών, είναι ισχύος 250kWp έως 1000kWp, ενώ ακολουθούν δεύτερα κατά σειρά με 35% τα φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος 10kWp έως 250kWp. Το 22% των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ισχύος άνω του 1MWp, ενώ το 7% αυτών είναι ισχύος κάτω από 10kWp.



Γράφημα 6: Συγκεντρωτικά μερίδια αγοράς συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022)

Σε ό,τι αφορά στις επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά συστήματα στην ελληνική αγορά, πριν από το διάστημα της ύφεσης της αγοράς (2014 - 2018), το 2012 και το 2013 είχαν πραγματοποιηθεί επενδύσεις 1,145€ δις και 1,524€ δις, ενώ το 2022 οι επενδύσεις έφτασαν και προβλέπεται να φτάσουν στα 1,034€ δις. Συνολικά, κατά το διάστημα 2010 – 2022 υλοποιήθηκαν επενδύσεις ύψους 7,218€ δις σε φωτοβολταϊκά συστήματα στην ελληνική αγορά.



Γράφημα 7: Επενδύσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022)

Σε ό,τι αφορά στο κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα, το κόστος το 2022 σε σχέση με το 2010 έχει μειωθεί κατά 76% για συστήματα ισχύος άνω του 1MWp, κατά 66% για συστήματα ισχύος 10kWp έως 1MWp και κατά 64% για συστήματα ισχύος κάτω από 10kWp. Σημειώνεται ότι το κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων μειωνόταν σταθερά από το 2010 μέχρι και το 2019, οπότε ξεκίνησε να αυξάνεται σταδιακά μέχρι και το 2022, απόρροια της εξέλιξης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων με την παραγωγή περισσότερο αποδοτικών φωτοβολταϊκών πάνελ, αλλά και κατόπιν αναδιάρθρωσης της αγοράς μετά την πενταετή ύφεση του 2014 – 2018.



Γράφημα 8: Εξέλιξη μέσου κόστους επένδυσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα στην ελληνική αγορά (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022)

Σε ό,τι αφορά στο μερίδιο των φωτοβολταϊκών στην εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η συμμετοχή των φωτοβολταϊκών έφτασε να αντιπροσωπεύει το 9,6% της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας το 2021, ενώ το 2010 μόλις το 0,3% της συνολικά

παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προερχόταν από φωτοβολταϊκά. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι μετά από την ταχεία αύξηση του μεριδίου των φωτοβολταϊκών στην εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το 0,3% το 2010 στο 6,4% το 2013, έκτοτε σημειώθηκε αύξηση μόλις 3,2 ποσοστιαίων μονάδων, απόρροια της ύφεσης της αγοράς των φωτοβολταϊκών κατά την περίοδο 2014 – 2018.



Γράφημα 9: Μερίδιο φωτοβολταϊκών στην εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022)



Γράφημα 10: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022)

Αντίστοιχα, ενώ το 2010 παράχθηκαν μόλις 0,2TWh ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, το 2021 παράχθηκαν 5,2TWh ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά.

Σύμφωνα με στοιχεία της ΡΑΕ και σε ό,τι αφορά στις εκδοθείσες άδειες για έργα ΑΠΕ, από το 2001 έχουν εκδοθεί 5.606 άδειες παραγωγών ΑΠΕ, συνολικής ισχύος 103,523GW (ΡΑΕ, 2023β). Από αυτές τις άδειες, οι 2.719 αφορούν σε φωτοβολταϊκά συστήματα, συνολικής

ισχύος 65,881GW. Ως εκ τούτου, τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν τη μερίδα του λέοντος των έργων ΑΠΕ στην Ελλάδα από το 2001 έως και το 2023.

Πίνακας 2: Σύνολο ισχύος αδειών παραγωγών ΑΠΕ και πλήθος αδειών ΑΠΕ από το 2001

Τεχνολογία ΑΠΕ	Πλήθος παραγωγών	Άθροισμα μέγιστης ισχύος (MW)
ΑΙΟΛΙΚΑ	2123,0	36013,2
ΒΙΟΜΑΖΑ	2,0	8,0
ΒΙΟΜΑΖΑ - ΒΙΟΑΕΡΙΟ	2,0	3,5
ΒΙΟΜΑΖΑ-ΒΙΟΑΕΡΙΟ	44,0	147,3
ΒΙΟΜΑΖΑ-ΚΑΥΣΗ	15,0	78,1
ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	1,0	8,0
ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΑ	37,0	208,5
ΜΥΗΕ	660,0	1120,5
Σ.Η.Θ.Υ.Α.	3,0	54,6
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	2719,0	65881,1
Γενικό Άθροισμα	5606,0	103522,9

Ειδικά σε ό,τι αφορά σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα με ενσωματωμένη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από το δίκτυο, έργα τα οποία εμπίπτουν στην παράγραφο 11Α του άρθρου 10, έχουν εκδοθεί συνολικά 31 άδειες σε παραγωγούς. Από αυτές, οι 29 άδειες αφορούν σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων αυτών φτάνει στα 1,83GW, η συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα των μονάδων αποθήκευσης αυτών φτάνει στις 3,198GWh, ενώ η συνολική εγγυημένη χωρητικότητα των μονάδων αποθήκευσης αυτών φτάνει στις 2,591GWh.

Πίνακας 3: Πλήθος αδειών, εγκατεστημένη ισχύς, εγκατεστημένη και εγγυημένη χωρητικότητα μονάδων ΑΠΕ με ενσωματωμένη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από το δίκτυο

Τεχνολογία	Άθροισμα εγκατεστημένης ισχύος (MW)	Άθροισμα εγκατεστημένης χωρητικότητας (MWh)	Άθροισμα εγγυημένης χωρητικότητας (MWh)	Πλήθος αδειών
ΑΙΟΛΙΚΑ	5,5	8,0	8,0	2,0
ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ	5,5	8,0	8,0	2,0
ΦΒ	1831,8	3190,0	2591,0	29,0
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΜΗ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΕΤΗΓΜΕΝΟΥ ΑΛΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	503,8	500,0	180,0	2,0
ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ	1328,0	2690,0	2402,6	27,0
Γενικό Άθροισμα	1837,3	3198,0	2590,6	31,0

Τέλος, σε ό,τι αφορά σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα με ενσωματωμένη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, με τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από το δίκτυο, έργα τα οποία εμπίπτουν στην παράγραφο 11B του άρθρου 10, έχουν εκδοθεί συνολικά 33 άδειες σε παραγωγούς. Από αυτές, οι 32 άδειες αφορούν σε φωτοβολταϊκά συστήματα, με την εγκατεστημένη ισχύ τους να φτάνει στα 857,2MW, την εγκατεστημένη χωρητικότητα των μονάδων αποθήκευσής τους να φτάνει στις 3,826GWh, και τη συνολική εγγυημένη χωρητικότητα των μονάδων αποθήκευσής τους να φτάνει στις 3,573GWh.

Πίνακας 4: Πλήθος αδειών, εγκατεστημένη ισχύς, εγκατεστημένη και εγγυημένη χωρητικότητα μονάδων ΑΠΕ με ενσωματωμένη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, με τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από το δίκτυο

Τεχνολογία	Άθροισμα εγκατεστημένης ισχύος (MW)	Άθροισμα εγκατεστημένης χωρητικότητας (MWh)	Άθροισμα εγγυημένης χωρητικότητας (MWh)	Πλήθος αδειών
ΑΙΟΛΙΚΑ	71,5	320	304	1
ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ	71,5	320	304	1
ΦΒ	857,2	3826,4	3573,2	32
ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ	857,2	3826,4	3573,2	32
Γενικό Άθροισμα	928,7	4146,4	3877,2	33

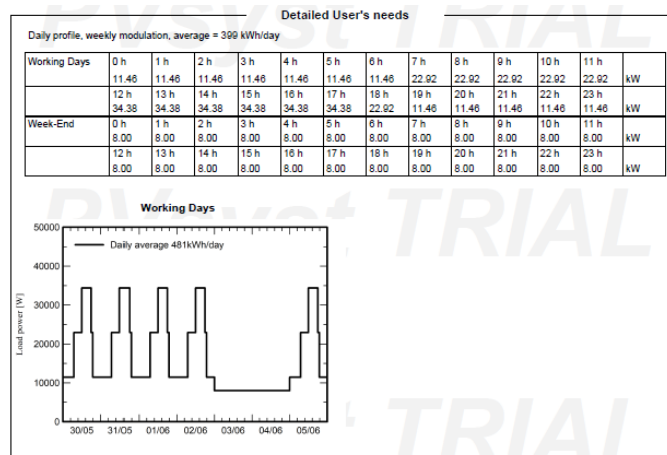
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Σύγκριση Φ/Β συστημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά

Στα πλαίσια της παρούσης μελετήθηκαν τρία φωτοβολταϊκά συστήματα για την κάλυψη της κατανάλωσης ενέργειας ενός καταναλωτή, με την καμπύλη φορτίου να δημιουργείται τυχαία στο PVsyst. Ο τόπος εγκατάστασης είναι το Ηράκλειο Κρήτης, περιοχή η οποία δεν ανήκει στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά και ως εκ τούτου δεν εμπίπτει σε ειδικούς περιορισμούς ισχύος. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκαν τρία σενάρια με φωτοβολταϊκά συστήματα διαφορετικής ισχύος και με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Ενεργειακός συμψηφισμός (κλαστικό net-metering) χωρίς μπαταρίες και με δυνατότητα έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο**
- **ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Πλήρως αυτόνομο σύστημα με αυτονομία 2 ημερών**
- **ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Ενεργειακός συμψηφισμός με μπαταρίες και με δυνατότητα έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο**

Παρακάτω παρατίθενται οι ωριαίες καταναλώσεις κατά τις καθημερινές και κατά τις αργίες (Σάββατο – Κυριακή), οι οποίες εισήχθησαν και στις τρεις προσομοιώσεις με σκοπό την κάλυψή τους από τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά συστήματα:

Πίνακας 5: Στοιχεία ιδιοκαταναλώσεων



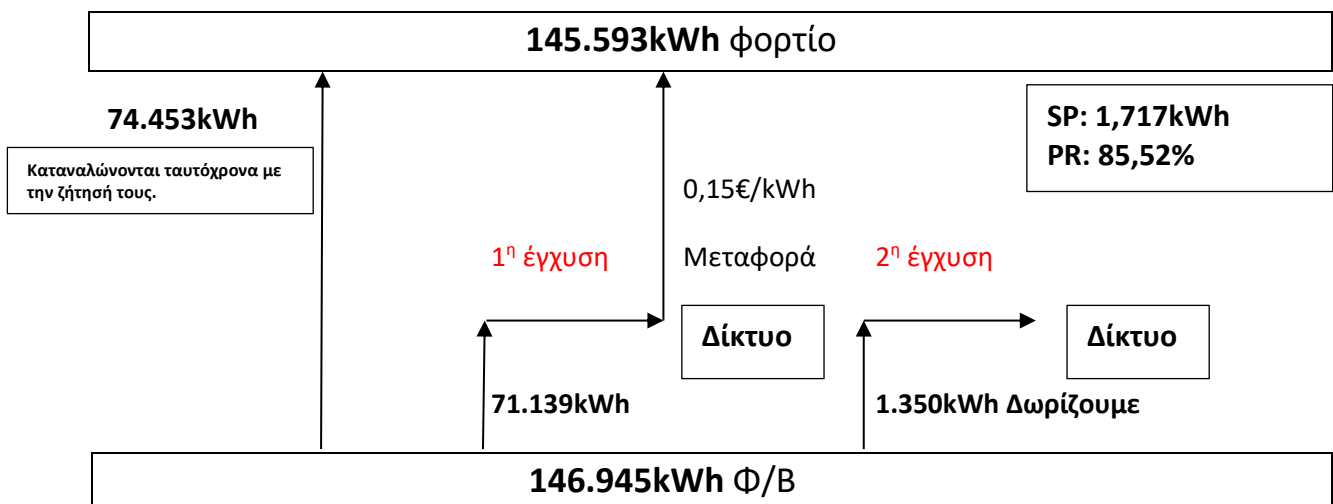
Αξίζει να σημειωθεί ότι στον παραπάνω πίνακα αναφέρεται η ωριαία ισχύς των ιδιοκαταναλώσεων, η οποία ρυθμίστηκε με τρόπο τέτοιο ώστε να φτάνει στην αιχμή της ανάμεσα στις 08:00 και τις 16:00, με μικρότερη ισχύ να ζητείται κατά τις ώρες εκτός του παραπάνω διαστήματος, οπότε και μειώνεται σημαντικά η ηλιοφάνεια, άρα και η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος μικραίνει ή και μηδενίζεται. Το σαββατοκύριακο η ισχύς

μειώνεται περαιτέρω και παραμένει σταθερή στα 8kW/h για λειτουργία φορτίων όπως φωτισμοί, κλιματισμοί σε servers, servers κ.α..

Για τις ανάγκες της παρούσης θεωρήθηκε ότι ο χώρος εγκατάστασης δε σκιάζεται από παρακείμενα εμπόδια, προκειμένου να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα σε ό,τι αφορά στην απόδοση του συστήματος και προκειμένου να απλοποιηθεί η μελέτη – προσομοίωση. Οι συντεταγμένες του χώρου εγκατάστασης έχουν ληφθεί από την υπηρεσία Meteorm, όπως και οι κλιματικές παράμετροι και δη η ένταση και διάρκεια της ηλιοφάνειας. Σε ό,τι αφορά στην κλίση των πάνελ, θεωρήθηκε πως αυτά θα εγκατασταθούν υπό γωνία 30°. Με τα παραπάνω δεδομένα εγκατάστασης, ελήφθησαν οι μέγιστες δυνατές αποδόσεις για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι οποίες προσεγγίζουν την μέγιστη διαθέσιμη απόδοση για την εξεταζόμενη περιοχή και λαμβάνουν τιμές άνω των 1,6kWh/kWp

6.1 ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Ενεργειακός συμψηφισμός χωρίς αποθήκευση ενέργειας με έγχυση ενέργειας στο δίκτυο και με προσπάθεια μηδενικής δωρεάς ενέργειας στο δίκτυο

Το φωτοβολταϊκό αποτελείται από 160 φωτοβολταϊκά πάνελ και ένα inverter τύπου SUN2000-100KTL-M1 της Huawei. Η ονομαστική ισχύς του inverter είναι 100kW. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι τύπου LX-535M της Luxor Solar με ονομαστική ισχύ 535Wp και είναι μονοκρυσταλλικά. Η ισχύς του συστήματος φτάνει στα 85,6kW. Σκοπός της διαστασιολόγησης του συστήματος είναι η κάλυψη των ιδιοκαταναλώσεων με την ελάχιστη δυνατή «δωρεά» ενέργειας στο δίκτυο.



Στον Πίνακα 6, παρουσιάζεται η σύνοψη του φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο προσομοιώθηκε στο PVSyst.

Πίνακας 6: Σύνοψη συστήματος

Project summary				
Geographical Site		Situation		
Irakleion		Latitude	35.34 °N	
Greece		Longitude	25.14 °E	
		Altitude	27 m	
		Time zone	UTC+2	
Meteo data		Project settings		
Irakleion		Albedo	0.20	
Meteonorm 8.1 (2004-2010), Sat=100% - Synthetic				
System summary				
Grid-Connected System		No 3D scene defined, no shadings		
PV Field Orientation		Near Shadings		
Fixed plane		No Shadings		
Tilt/Azimuth	30 / 0 °	User's needs		
		Daily profile		
		weekly modulation		
		Average	399 kWh/Day	
System information				
PV Array				
Nb. of modules	160 units	Inverters	1 unit	
Pnom total	85.6 kWp	Nb. of units	100 kWac	
		Pnom total	0.856	
		Pnom ratio		
Results summary				
Produced Energy	146945 kWh/year	Specific production	1717 kWh/kWp/year	
Used Energy	145593 kWh/year	Perf. Ratio PR	85.52 %	
		Solar Fraction SF	51.14 %	
Table of contents				
Project and results summary	_____			2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	_____			3
Detailed User's needs	_____			5
Main results	_____			6
Loss diagram	_____			7
Predef. graphs	_____			8
P50 - P90 evaluation	_____			9
Single-line diagram	_____			10
Cost of the system	_____			11
Financial analysis	_____			12
CO ₂ Emission Balance	_____			15

Σύμφωνα με τη σύνοψη των αποτελεσμάτων από τη μελέτη – προσομοίωση του φωτοβολταϊκού συστήματος, το φωτοβολταϊκό σύστημα αναμένεται να παράγει 146.945kWh ανά έτος. Ο ειδικός δείκτης απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος φτάνει στις 1,717kWh ανά 1 εγκαταστημένο Wp ή η ειδική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος φτάνει στις 1.717kWh/kWp/έτος καθώς όπως προαναφέρεται έχουν θεωρηθεί βέλτιστες συνθήκες εγκατάστασης (προσανατολισμός, αζιμούθιο, κλίση, σκιάσεις). Η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται ίση με 85,52%, ενώ το φωτοβολταϊκό σύστημα υπολογίζεται ότι θα καλύπτει το 51,14% των αναγκών ιδιοκατανάλωσης ταυτόχρονα με τη ζήτηση (Solar Fraction – SF).

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά συστήματος

General parameters		
Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation	Sheds configuration	Models used
Orientation	No 3D scene defined	Transposition Perez
Fixed plane		Diffuse Perez, Meteorom
Tilt/Azimuth	30 / 0 °	Circumsolar with diffuse
Horizon	Near Shadings	User's needs
Free Horizon	No Shadings	Daily profile
		weekly modulation
		Average 399 kWh/Day

PV Array Characteristics			
PV module	Generic	Inverter	Generic
Manufacturer		Manufacturer	
Model	LX-535M/182-144*	Model	SUN2000-100KTL-M1-400Vac
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	535 Wp	Unit Nom. Power	100 kWac
Number of PV modules	160 units	Number of inverters	1 unit
Nominal (STC)	85.6 kWp	Total power	100 kWac
Modules	10 Strings x 16 in series	Operating voltage	200-1000 V
At operating cond. (50°C)		Max. power (=>33°C)	110 kWac
Pmpp	77.9 kWp	Pnom ratio (DC:AC)	0.86
U mpp	592 V	Power sharing within this inverter	
I mpp	132 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	86 kWp	Total power	100 kWac
Total	160 modules	Max. power	110 kWac
Module area	414 m ²	Number of inverters	1 unit
Cell area	380 m ²	Pnom ratio	0.86

Array losses									
Thermal Loss factor	DC wiring losses	Module Quality Loss							
Module temperature according to irradiance	Global array res.	Loss Fraction	-0.8 %						
Uc (const)	75 mΩ								
Uv (wind)	Loss Fraction	1.5 % at STC							
Module mismatch losses	Strings Mismatch loss								
Loss Fraction	Loss Fraction	0.2 %							
2.0 % at MPP									
IAM loss factor	Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290								
	0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
	1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000

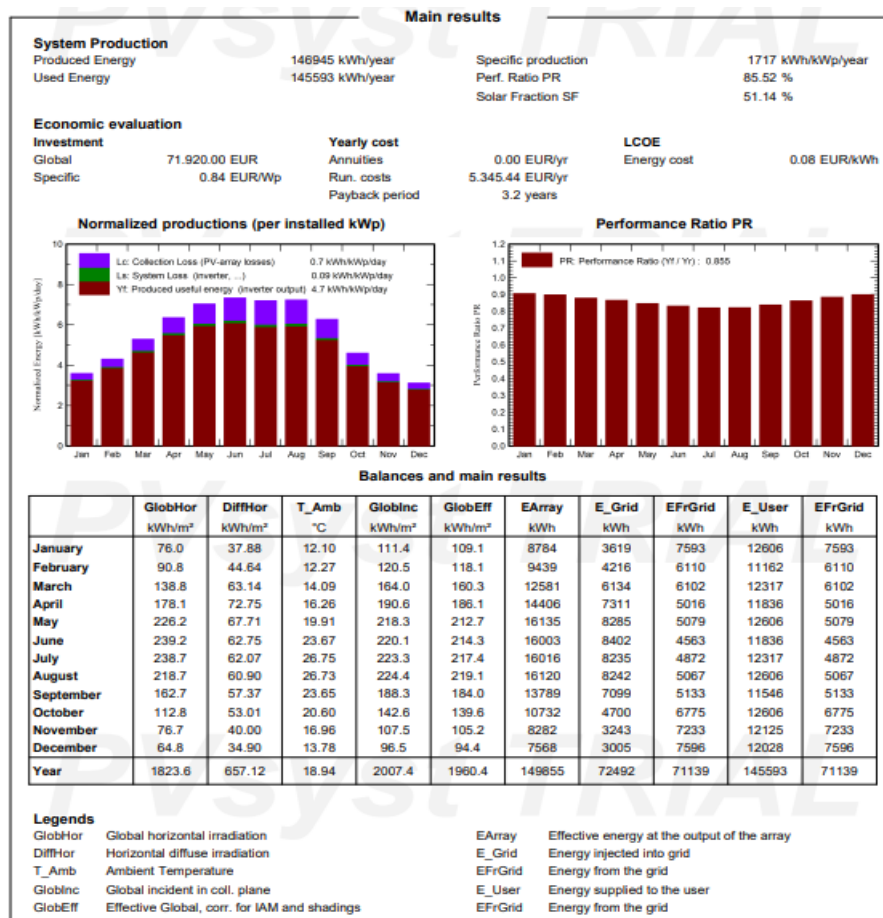
AC wiring losses	
Inv. output line up to injection point	
Inverter voltage	400 Vac tri
Loss Fraction	0.40 % at STC
Inverter: SUN2000-100KTL-M1-400Vac	
Wire section (1 Inv.)	Copper 1 x 3 x 50 mm ²
Wires length	20 m

Σε ό,τι αφορά στις απώλειες ισχύος των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ, αυτές υπολογίζονται ίσες με 20W/m²K απουσία ανέμου και υπολογίζονται μηδενικές παρουσία ανέμου. Οι απώλειες των DC καλωδιώσεων υπολογίζονται σε 1,5% σε συνθήκες STC, καθώς η συνολική ωμική αντίσταση των DC καλωδιώσεων υπολογίζεται ίση με 75mΩ. Επιπλέον, υπολογίζεται αρνητική απώλεια (κέρδος) ισχύος της τάξεως του 0,8% λόγω της απόκλισης των πραγματικών από τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάνελ. Επιπρόσθετα, λόγω της επιλεγείσας διάταξης των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ υπολογίζεται

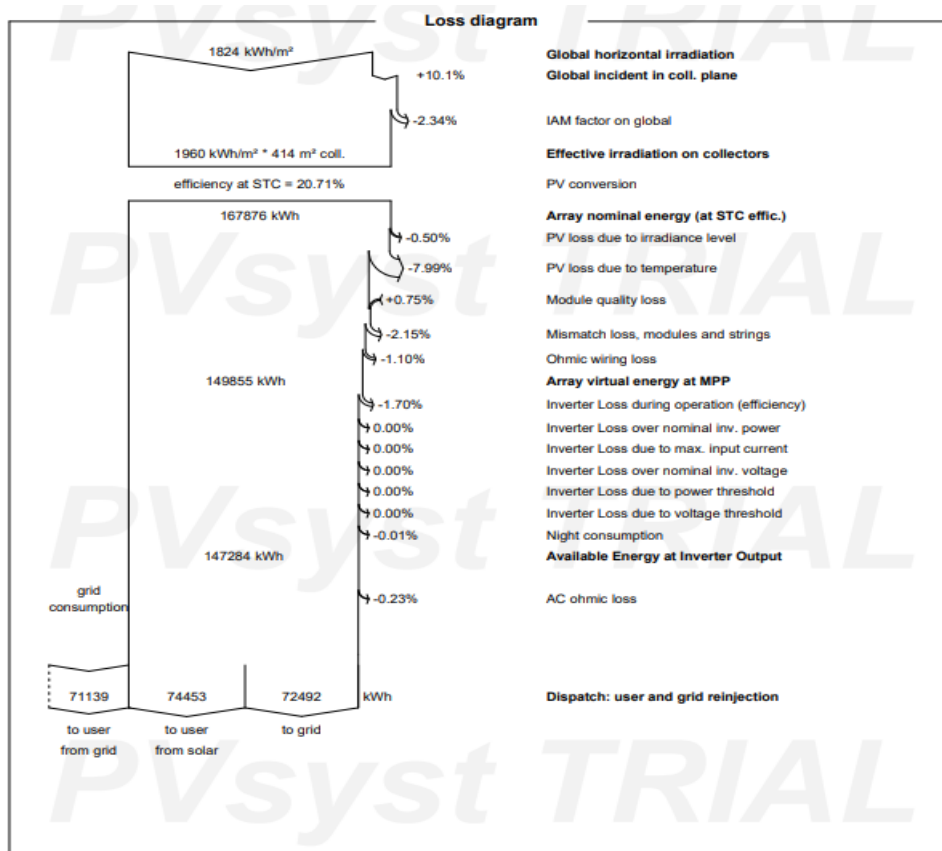
απώλεια ισχύος της τάξης του 0,2%, ενώ λόγω των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πάνελ και για τις κλιματικές συνθήκες στο χώρο εγκατάστασης υπολογίζονται απώλειες ισχύος της τάξης του 2% σε συνθήκες MPP. Τέλος, καθώς μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πάνελ, σημειώνονται επιπρόσθετες απώλειες λόγω αντανάκλασης και διάθλασης, οι οποίες κυμαίνονται από 0% για γωνία πρόσπτωσης 90° έως και 56% για γωνία πρόσπτωσης 85°. Σε ό,τι αφορά στις απώλειες AC ισχύος, αυτές υπολογίζονται ίσες με 0,40% σε συνθήκες STC από την έξοδο του inverter μέχρι το σημείο όπου η ενέργεια καταναλώνεται, με δεδομένο ότι η γραμμή τροφοδοσίας του inverter είναι διατομής 50mm² ανά φάση και έχει μήκος 20m.

Κατόπιν εισαγωγής του κόστους του εξοπλισμού, της εγκατάστασης, της μελέτης, της ασφάλισης και της συντήρησης του φωτοβολταϊκού συστήματος, υπολογίζεται ότι το κόστος του μελετώμενου συστήματος ανέρχεται σε 71.920€ ή σε 0,84€/Wp. Τα ετήσια κόστη λειτουργίας ανέρχονται σε 5345,44€, ενώ η απόσβεση υπολογίζεται ότι επιτυγχάνεται σε 3,2 έτη. Το κανονικοποιημένο επίπεδο κόστους ενέργειας (LCOE) υπολογίζεται ίσο με 0,08€/kWh.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης

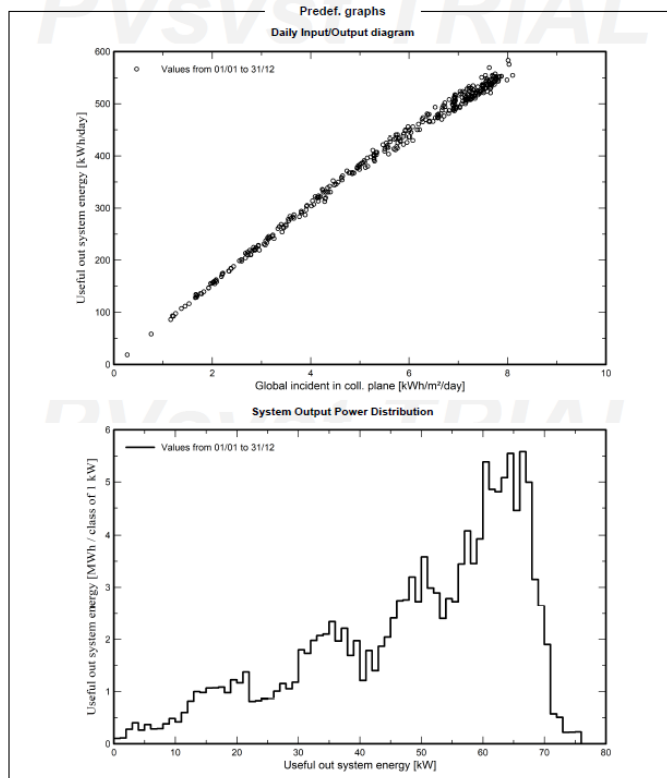


Στο Γράφημα 19, φαίνεται ότι η παραγωγή αυξάνεται κατά το διάστημα Απριλίου – Σεπτεμβρίου, ωστόσο παράλληλα η απόδοση του συστήματος μειώνεται κατά το ίδιο διάστημα, ως αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, αν και υπάρχει περισσότερη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, μικρότερο μέρος της μετατρέπεται σε ηλεκτρική, καθώς τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν μικρότερη απόδοση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Τέλος, στον παραπάνω πίνακα καταγράφονται αναλυτικά τα κυριότερα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Μεταξύ αυτών αποτυπώνεται ότι οι ιδιοκαταναλώσεις φτάνουν στις 145.593kWh. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα και με το παρακάτω Sankey γράφημα, όπου αποτυπώνονται αναλυτικά οι απώλειες ισχύος και η ροή της ενέργειας, φαίνεται ότι από την ετήσια παραγόμενη ενέργεια των 146.943kWh, οι 74.453kWh καταναλώνονται ταυτόχρονα με τη ζήτησή τους, το σύστημα εγχέει στο δίκτυο περίσσειες ενέργειας ύψους 72.492kWh και τροφοδοτείται από το δίκτυο με ενέργεια ύψους 71.139kWh. Ως εκ τούτου, το σύστημα καλύπτει όλες τις ιδιοκαταναλώσεις και «δωρίζει» 1.350kWh/έτος στο δίκτυο. Εξετάστηκε η δυνατότητα προσομοίωσης με άλλη διαστασιολόγηση η οποία να παράγει ενέργεια ώστε να καλύπτει επακριβώς τις ιδιοκαταναλώσεις, ωστόσο η παρούσα διαστασιολόγηση είναι αυτή που οδηγεί στην ελάχιστη «δωρεά» ενέργεια στο δίκτυο.



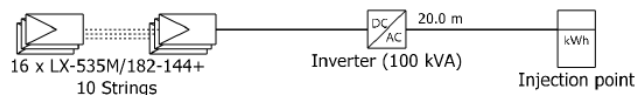
Γράφημα 11: Διάγραμμα απωλειών ενέργειας

Στο Γράφημα 20, αποτυπώνεται η απόδοση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στο επάνω γράφημα αποτυπώνεται η σχέση ανάμεσα στη διαθέσιμη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Στο κάτω γράφημα αποτυπώνεται η σχέση ανάμεσα στη διαθέσιμη ηλιακή ισχύ και στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



Γράφημα 12: Γραφήματα παραγωγής και κατανομής παραγόμενης ενέργειας

Παρακάτω παρατίθεται το μονογραμμικό διάγραμμα του μελετώμενου φωτοβολταϊκού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από 10 συστοιχίες φωτοβολταϊκών πάνελ, με κάθε συστοιχία να αποτελείται από 16 φωτοβολταϊκά πάνελ. Οι συστοιχίες αυτές συνδέονται στο inverter και η έξοδός του συνδέεται στο δίκτυο προκειμένου η παραγόμενη ενέργεια να τροφοδοτείται στις ιδιοκαταναλώσεις.



Εικόνα 9: Μονογραμμικό διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος

Σε ό,τι αφορά στο κόστος του μελετώμενου συστήματος ελήφθησαν τιμοκατάλογοι από εταιρείες προμήθειας φωτοβολταϊκού εξοπλισμού, ενώ το κόστος για την εγκατάσταση, ασφάλιση και λειτουργία θεωρήθηκε κατόπιν έρευνας στο διαδίκτυο. Το κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος με το σύστημα έτοιμο να λειτουργήσει ανέρχεται σε 71.920€. Σε

ό,τι αφορά στα λειτουργικά κόστη, αυτά υπολογίζονται ίσα με 2,800€, ενώ από τον υπολογισμό της παρούσης αξίας του με δεδομένο ότι ο πληθωρισμός ανέρχεται σε 5%, τα λειτουργικά κόστη υπολογίζονται σε 5,345€ κατά έτος. Το προσαρμοσμένο ειδικό κόστος της ενέργειας υπολογίζεται ίσο με 0,079€/kWh.

Πίνακας 9: Κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος

Installation costs			
Item	Quantity	Cost	Total
	units	EUR	EUR
PV modules			
LX-535M/182-144+	160	200.00	32.000.00
Supports for modules	160	10.00	1.600.00
Inverters			
SUN2000-100KTL-M1-400Vac	1	6.500.00	6.500.00
Other components			
Accessories, fasteners	1	5.000.00	5.000.00
Wiring	1	6.000.00	6.000.00
Monitoring system, display screen	1	2.000.00	2.000.00
Measurement system, pyranometer	1	2.000.00	2.000.00
Surge arrester	1	500.00	500.00
Studies and analysis			
Engineering	1	7.000.00	7.000.00
Permitting and other admin. Fees	1	1.000.00	1.000.00
Installation			
Global installation cost per module	160	30.00	4.800.00
Global installation cost per inverter	1	1.000.00	1.000.00
Global installation cost per battery	1	20.00	20.00
Transport	1	1.000.00	1.000.00
Settlings	1	500.00	500.00
Grid connection	1	500.00	500.00
Insurance			
Building insurance	1	300.00	300.00
Transport insurance	1	200.00	200.00
		Total	71.920.00
		Depreciable asset	45.100.00

Operating costs	
Item	Total
	EUR/year
Maintenance	
Provision for inverter replacement	1.300.00
Salaries	600.00
Repairs	400.00
Cleaning	200.00
Insurance	
Facilities insurance	300.00
Total (OPEX)	2.800.00
Including inflation (5.00%)	5.345.44

System summary	
Total installation cost	71.920.00 EUR
Operating costs (incl. inflation 5.00%/year)	5.345.44 EUR/year
Useful energy from solar	74.5 MWh/year
Energy sold to the grid	72.5 MWh/year
Cost of produced energy (LCOE)	0.079 EUR/kWh

Για το μελετώμενο έργο τέθηκε ότι η διάρκεια ζωής του φτάνει στα 25 έτη, ίση με τη διάρκεια των συμβάσεων σύνδεσης που συνάπτει ο διαχειριστής του δικτύου για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι ο πληθωρισμός θα παραμένει ίσος με 5% καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος, ότι η απόδοσή του θα φθίνει κατά 1% κατά έτος, λόγω γήρανσης του εξοπλισμού, και ότι το επιτόκιο προεξόφλησης ισούται με 7% για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας των μελλοντικών χρηματοροών. Θεωρήθηκε ότι το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 0,30€/kWh και ότι το κέρδος από την ιδιοκατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε 0,15€/kWh. Η τιμή 0,15€/kWh εισήχθη προκειμένου να υπολογιστεί ότι για κάθε kWh η οποία έχει εγχυθεί στο δίκτυο σε περίοδο περίσσειας της παραγωγής ενέργειας και η οποία έχει απορροφηθεί εκ των υστέρων σε περίοδο υστέρησης της παραγωγής χρεώνεται με 0,15€ για μεταφορά και διανομή.

Η περίοδος απόσβεσης υπολογίζεται ίση με 3,2 έτη. Η καθαρή παρούσα αξία του μελετώμενου έργου υπολογίζεται ίση με 192.994€. Ο συντελεστής εσωτερικής απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR) υπολογίζεται ίσος με 35,05%, ενώ η απόδοση της επένδυσης ανέρχεται σε 268,3%.

Πίνακας 10: Οικονομική ανάλυση

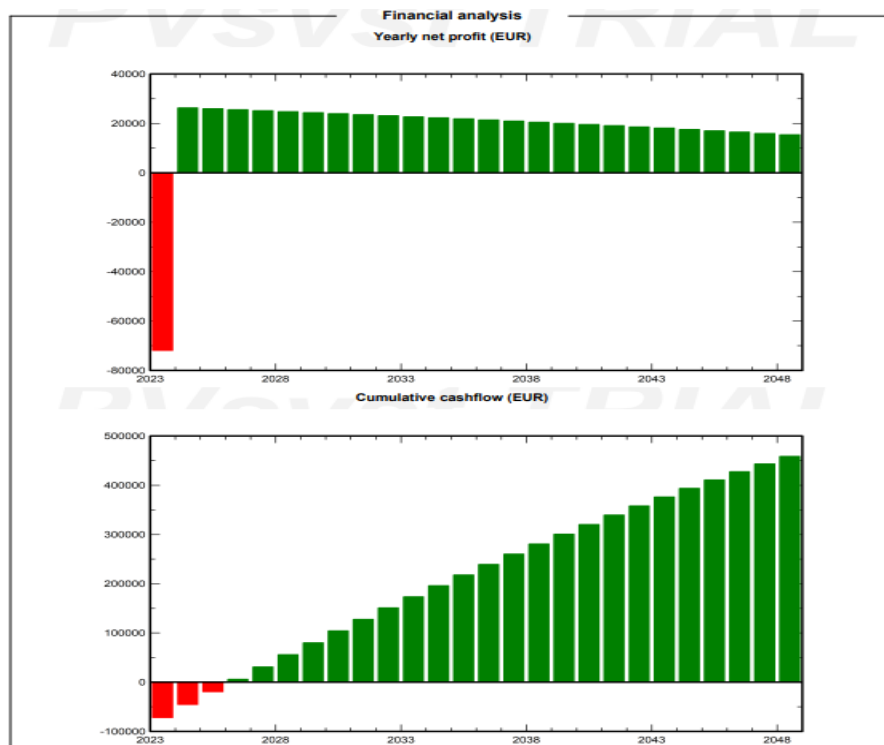
Financial analysis				
Simulation period				
Project lifetime	25 years	Start year	2024	
Income variation over time				
Inflation				5.00 %/year
Production variation (aging)				-1.00 %/year
Discount rate				7.00 %/year
Income dependent expenses				
Income tax rate				22.00 %/year
Other income tax				0.00 %/year
Dividends				0.00 %/year
Depreciable assets				
Asset	Depreciation method	Depreciation period (years)	Salvage value (EUR)	Depreciable (EUR)
PV modules				
LX-535M/182-144+	Straight-line	25	0.00	32.000.00
Supports for modules	Straight-line	25	0.00	1.600.00
Inverters				
SUN2000-100KTL-M1-400Vac	Straight-line	25	0.00	6.500.00
Accessories, fasteners	Straight-line	20	0.00	5.000.00
		Total	0.00	45.100.00
Financing				
Own funds	71.920.00 EUR			
Electricity sale				
Feed-in tariff	0.3000 EUR/kWh			
Duration of tariff warranty	25 years			
Annual connection tax	0.00 EUR/kWh			
Annual tariff variation	0.0 %/year			
Feed-in tariff decrease after warranty	0.00 %			
Self-consumption				
Consumption tariff	0.1500 EUR/kWh			
Tariff evolution	0.0 %/year			
Return on investment				
Payback period	3.2 years			
Net present value (NPV)	192.994.42 EUR			
Internal rate of return (IRR)	35.05 %			
Return on investment (ROI)	268.3 %			

Η ανάλυση των ετήσιων χρηματοροών παρατίθεται παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υπολογιζόμενα κέρδη από τη λειτουργία του μελετώμενου φωτοβολταϊκού συστήματος προκύπτουν από την εξοικονόμηση προμήθειας ενέργειας από το δίκτυο. Στον παρακάτω πίνακα καταγράφεται ετήσια αύξηση των λειτουργικών εξόδων, λόγω ετήσιου πληθωρισμού 5%.

Πίνακας 11: Πίνακας χρηματοροών

Financial analysis										
Detailed economic results (EUR)										
Year	Electricity sale	Own funds	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Self-cons. saving	Cumul. profit	% amortL
0	0	71.920	0	0	0	0	0	0	-71.920	0.0%
1	21.752	0	2.800	1.854	17.098	3.762	15.191	11.168	-47.286	34.3%
2	21.535	0	2.940	1.854	16.741	3.683	14.912	11.056	-24.604	65.8%
3	21.320	0	3.087	1.854	16.379	3.603	14.629	10.946	-3.727	94.8%
4	21.106	0	3.241	1.854	16.011	3.522	14.343	10.836	15.482	121.5%
5	20.895	0	3.403	1.854	15.638	3.440	14.052	10.728	33.149	146.1%
6	20.686	0	3.574	1.854	15.259	3.357	13.756	10.621	49.393	168.7%
7	20.480	0	3.752	1.854	14.873	3.272	13.455	10.514	64.320	189.4%
8	20.275	0	3.940	1.854	14.481	3.186	13.149	10.409	78.031	208.5%
9	20.072	0	4.137	1.854	14.081	3.098	12.837	10.305	90.619	226.0%
10	19.871	0	4.344	1.854	13.674	3.008	12.519	10.202	102.169	242.1%
11	19.673	0	4.561	1.854	13.258	2.917	12.195	10.100	112.762	256.9%
12	19.476	0	4.789	1.854	12.833	2.823	11.854	9.999	122.469	270.3%
13	19.281	0	5.028	1.854	12.399	2.728	11.525	9.899	131.359	282.6%
14	19.088	0	5.280	1.854	11.954	2.630	11.178	9.800	139.495	294.0%
15	18.897	0	5.544	1.854	11.500	2.530	10.824	9.702	146.935	304.3%
16	18.708	0	5.821	1.854	11.033	2.427	10.460	9.605	153.731	313.9%
17	18.521	0	6.112	1.854	10.555	2.322	10.087	9.509	159.935	322.4%
18	18.336	0	6.418	1.854	10.064	2.214	9.704	9.414	165.592	330.2%
19	18.153	0	6.739	1.854	9.560	2.103	9.311	9.320	170.743	337.4%
20	17.971	0	7.075	1.854	9.042	1.989	8.907	9.227	175.429	343.9%
21	17.792	0	7.429	1.604	8.758	1.927	8.435	9.134	179.672	349.8%
22	17.614	0	7.801	1.604	8.209	1.806	8.007	9.043	183.521	355.2%
23	17.437	0	8.191	1.604	7.643	1.681	7.565	8.953	187.005	360.0%
24	17.263	0	8.600	1.604	7.059	1.553	7.110	8.863	190.154	364.4%
25	17.090	0	9.030	1.604	6.455	1.420	6.640	8.774	192.994	368.3%
Total	483.294	71.920	133.636	45.100	304.558	67.003	282.655	248.130	192.994	368.3%

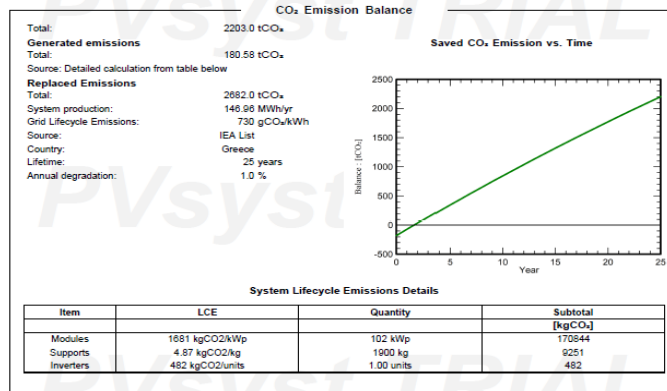
Στα δύο παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται τα ετήσια καθαρά κέρδη από τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος (επάνω γράφημα) και οι σωρευτικές ταμειακές ροές από τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος (κάτω γράφημα).



Γράφημα 13: Ετήσια κέρδη και σωρευτικές ταμειακές ροές

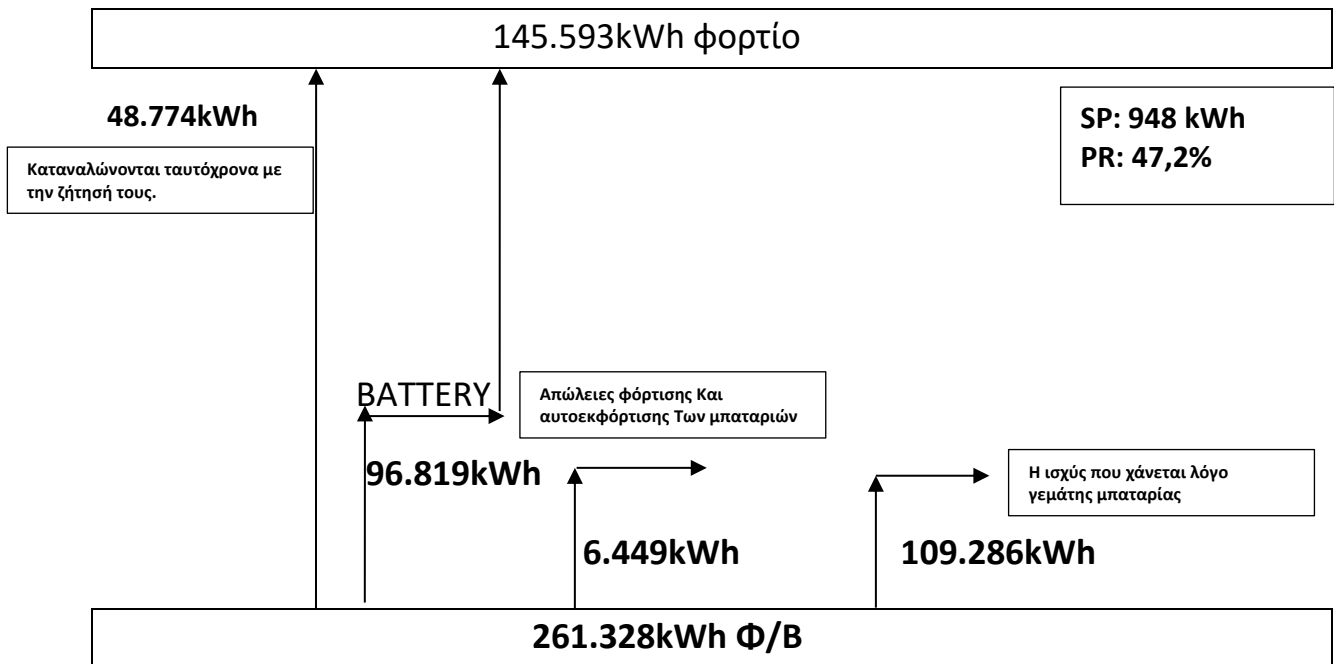
Τέλος, το πρόγραμμα προσομοίωσης υπολογίζει το ισοζύγιο εκπομπής αερίων ρύπων (CO₂) για τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Υπολογίζεται ότι το τέλος της διάρκειας ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος θα έχουν «εξοικονομηθεί» 2.203t CO₂. Κατά την εγκατάσταση του συστήματος το ισοζύγιο είναι αρνητικό, λόγω του αρνητικού αποτυπώματος άνθρακα του προς εγκατάσταση εξοπλισμού, ενώ κάθε χρόνο το ισοζύγιο αυτό αυξάνεται, καθώς παράγεται ηλεκτρική ενέργεια ενώ παράλληλα δεν εκπέμπονται άλλοι ρύποι.

Πίνακας 12: Ισοζύγιο εκπομπής ρύπων CO₂



6.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Πλήρως αυτόνομο σύστημα με αυτονομία 2 ημερών

Στη συνέχεια διαστασιολογήθηκε και προσομοιάστηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με σκοπό την κάλυψη των ιδιοκαταναλώσεων με διάστημα αυτονομίας δυο ημερών. Ως εκ τούτου, το μελετώμενο φωτοβολταϊκό σύστημα σχεδιάστηκε ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι ιδιοκαταναλώσεις καλύπτονται ακόμη και υπό το σενάριο της αδυναμίας παραγωγής ενέργειας για δυο συνεχόμενες ημέρες. Το φωτοβολταϊκό αποτελείται από 287 μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πάνελ, τύπου LX-535M της Luxor Solar με ονομαστική ισχύ 535Wp. Επιπλέον, διαθέτει έντεκα ρυθμιστές φόρτισης – μετατροπείς ενέργειας τύπου SmartSolar MPPT RS 450/200, για τη ρύθμιση της φόρτισης των μπαταριών και για την μετατροπή της DC ενέργειας σε AC ενέργεια προκειμένου για την τροφοδότηση των φορτίων του καταναλωτή. Τέλος, διαθέτει διάταξη αποθήκευσης ενέργειας με ονομαστική τάση 48V, αποτελούμενη από 24 μπαταρίες ονομαστικής τάσης 2V συνδεδεμένες σε σειρά και 34 τέτοιες συστοιχίες συνδεδεμένες παράλληλα, δηλαδή 816 μπαταρίες συνολικά. Οι μπαταρίες διαθέτουν ονομαστική χωρητικότητα 36.414 Ah σε C10 εκφόρτιση και βάθος εκφόρτισης 50%. Συνολικά, η εγκατεστημένη ισχύς φτάνει στα 154kWp. Αν και το σύστημα καλύπτει τις ίδιες ιδιοκαταναλώσεις με το προηγούμενο σύστημα, απαιτείται περισσότερη εγκατεστημένη ισχύς προκειμένου να φορτίζονται οι μπαταρίες με επαρκή ενέργεια για λειτουργία δυο ημερών χωρίς νέα παραγωγή ενέργειας. Το σύστημα έχει χαμηλό βαθμό απόδοσης, καθώς ενώ μπορεί να παράγει συνολικά 261.328kWh, εντούτοις οι 109.286kWh αποκόπτονται, καθώς θα παράγονταν σε διαστήματα όπου οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες(η ισχύς που χάνεται λόγω γεμάτης μπαταρίας).



Στον Πίνακα 13, παρουσιάζεται η σύνοψη του φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο προσομοιώθηκε στο PVSyst.

Πίνακας 13: Σύνοψη συστήματος

Project summary			
Geographical Site Irakleion Greece	Situation	Latitude	35.34 °N
		Longitude	25.14 °E
		Altitude	27 m
		Time zone	UTC+2
	Project settings	Albedo	0.20
Meteo data Irakleion Meteonorm 8.1 (2004-2010), Sat=100% - Synthetic			

System summary			
Standalone system		Standalone system with batteries	
PV Field Orientation Fixed plane Tilt/Azimuth 30 / 0 °		User's needs Daily profile weekly modulation Average 399 kWh/Day	
System information			
PV Array			
Nb. of modules	287 units	Battery pack	Technology Lead-acid, sealed, Gel
Pnom total	154 kWp	Nb. of units	816 units
		Voltage	48 V
		Capacity	36414 Ah

Results summary			
Useful energy from solar	145593 kWh/year	Specific production	948 kWh/kWp/year
Missing Energy	0 kWh/year	Perf. Ratio PR	47.20 %
Excess (unused)	109286 kWh/year	Available solar energy	261328 kWh/year
		Solar Fraction SF	100.00 %

Table of contents	
Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Detailed User's needs	5
Main results	6
Loss diagram	7
Predef. graphs	8
Cost of the system	9
Financial analysis	10

Ο ειδικός δείκτης απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος φτάνει στις 0,948kWh ανά 1 εγκαταστημένο Wp ή η ειδική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος φτάνει στις 948 kWh/kWp/έτος. Η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται ίση με 47,2%, ενώ το φωτοβολταϊκό σύστημα υπολογίζεται ότι θα καλύπτει το 100% των αναγκών ιδιοκατανάλωσης (Solar Fraction – SF). Σημειωτέον, όπως σχολιάζεται παρακάτω, ο χαμηλός βαθμός απόδοσης οφείλεται στο γεγονός ότι μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας δεν αξιοποιείται και αποκόπτεται, καθώς οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες. Δεδομένου ότι βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, το φωτοβολταϊκό σύστημα αναμένεται να παράγει 261.328kWh ανά έτος, ο βαθμός απόδοσης θα έφτανε στο 1,693 ή 1.693kWh/kWp/έτος αν όλη η ενέργεια αξιοποιούνταν.

Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά συστήματος

General parameters			
Standalone system		Standalone system with batteries	
PV Field Orientation			
Orientation		Sheds configuration	
Fixed plane		No 3D scene defined	
Tilt/Azimuth		30 / 0 °	
Models used			
		Transposition Perez	
		Diffuse Perez, Meteorom separate	
		Circumsolar	
User's needs			
Daily profile			
weekly modulation			
Average		399 kWh/Day	

PV Array Characteristics			
PV module		Battery	
Manufacturer Generic		Manufacturer Generic	
Model LX-535M/182-144+		Model 2V 9 RES OPZV 1400	
(Original PVsyst database)		Technology Lead-acid, sealed, Gel	
Unit Nom. Power 535 Wp		Nb. of units 34 in parallel x 24 in series	
Number of PV modules 287 units		Discharging min. SOC 20.0 %	
Nominal (STC) 154 kWp		Stored energy 1398.3 kWh	
Modules 41 Strings x 7 In series		Battery Pack Characteristics	
At operating cond. (50°C)		Voltage 48 V	
Pmpp 140 kWp		Nominal Capacity 36414 Ah (C10)	
U mpp 259 V		Temperature Fixed 20 °C	
I mpp 540 A			
Controller		Battery Management control	
Manufacturer Generic		Threshold commands as SOC calculation	
Model SmartSolar MPPT RS 450/200		Charging SOC = 0.90 / 0.75	
Nb. units 11 units		approx. 53.3 / 50.1 V	
Technology MPPT converter		Discharging SOC = 0.20 / 0.45	
Temp coeff. -2.7 mV/°C/Elem.		approx. 47.2 / 48.9 V	
Converter			
Maxi and EURO efficiencies 96.0 / 95.0 %			
Total PV power			
Nominal (STC) 154 kWp			
Total 287 modules			
Module area 742 m²			
Cell area 682 m²			

Array losses			
Thermal Loss factor		DC wiring losses	
Module temperature according to irradiance		Global array res. 8.0 mΩ	
Uc (const) 20.0 W/m²K		Loss Fraction 1.5 % at STC	
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s		Serie Diode Loss	
		Voltage drop 0.7 V	
		Loss Fraction 0.2 % at STC	
Module Quality Loss		Module mismatch losses	
Loss Fraction -0.8 %		Loss Fraction 2.0 % at MPP	
		Strings Mismatch loss	
		Loss Fraction 0.2 %	

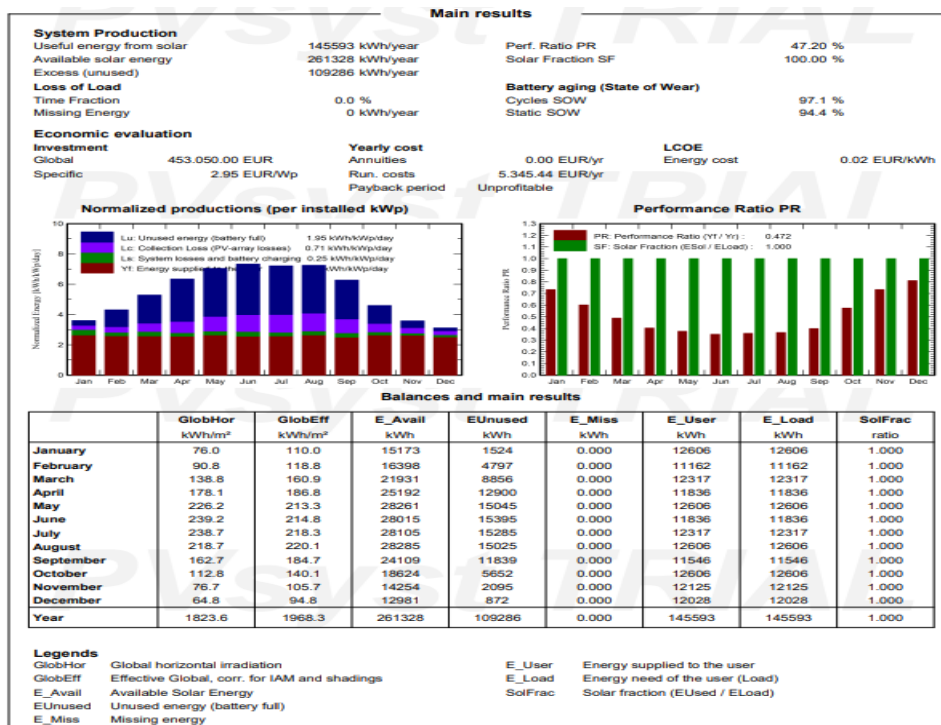
Array losses									
IAM loss factor									
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290									
0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°	
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000	

Σε ό,τι αφορά στις απώλειες ισχύος των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ, αυτές υπολογίζονται ίσες με 20W/m²K απουσία ανέμου και υπολογίζονται μηδενικές παρουσία ανέμου. Οι απώλειες των DC καλωδιώσεων υπολογίζονται σε 1,5% σε συνθήκες STC, καθώς

η συνολική ωμική αντίσταση των DC καλωδιώσεων υπολογίζεται ίση με 9,1mΩ. Επιπλέον, υπολογίζεται αρνητική απώλεια (κέρδος) ισχύος της τάξεως του 0,8% λόγω της απόκλισης των πραγματικών από τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάνελ. Επιπρόσθετα, λόγω της επιλεγείσας διάταξης των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ υπολογίζεται απώλεια ισχύος της τάξης του 0,2%, ενώ λόγω των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πάνελ και για τις κλιματικές συνθήκες στο χώρο εγκατάστασης υπολογίζονται απώλειες ισχύος της τάξης του 2% σε συνθήκες MPP. Τέλος, καθώς μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πάνελ, σημειώνονται επιπρόσθετες απώλειες λόγω αντανάκλασης και διάθλασης, οι οποίες κυμαίνονται από 0% για γωνία πρόσπτωσης 90° έως και 56% για γωνία πρόσπτωσης 85°.

Κατόπιν εισαγωγής του κόστους του εξοπλισμού, της εγκατάστασης, της μελέτης, της ασφάλισης και της συντήρησης του φωτοβολταϊκού συστήματος, υπολογίζεται ότι το κόστος του μελετώμενου συστήματος ανέρχεται σε 453.050€ ή σε 2,95€/Wp. Τα ετήσια κόστη λειτουργίας ανέρχονται σε 5.345€, ενώ δεν επιτυγχάνεται απόσβεση εντός της ορισμένης διάρκειας ζωής του έργου (25 έτη). Το κανονικοποιημένο επίπεδο κόστους ενέργειας (LCOE) υπολογίζεται ίσο με 0,02€/kWh. Όπως προαναφέρεται, το σύστημα έχει χαμηλό βαθμό απόδοσης, καθώς ενώ μπορεί να παράγει συνολικά 261.328kWh, εντούτοις οι 109.286kWh αποκόπτονται, καθώς θα παράγονταν σε διαστήματα όπου οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες.

Πίνακας 15: Αποτελέσματα προσομοίωσης

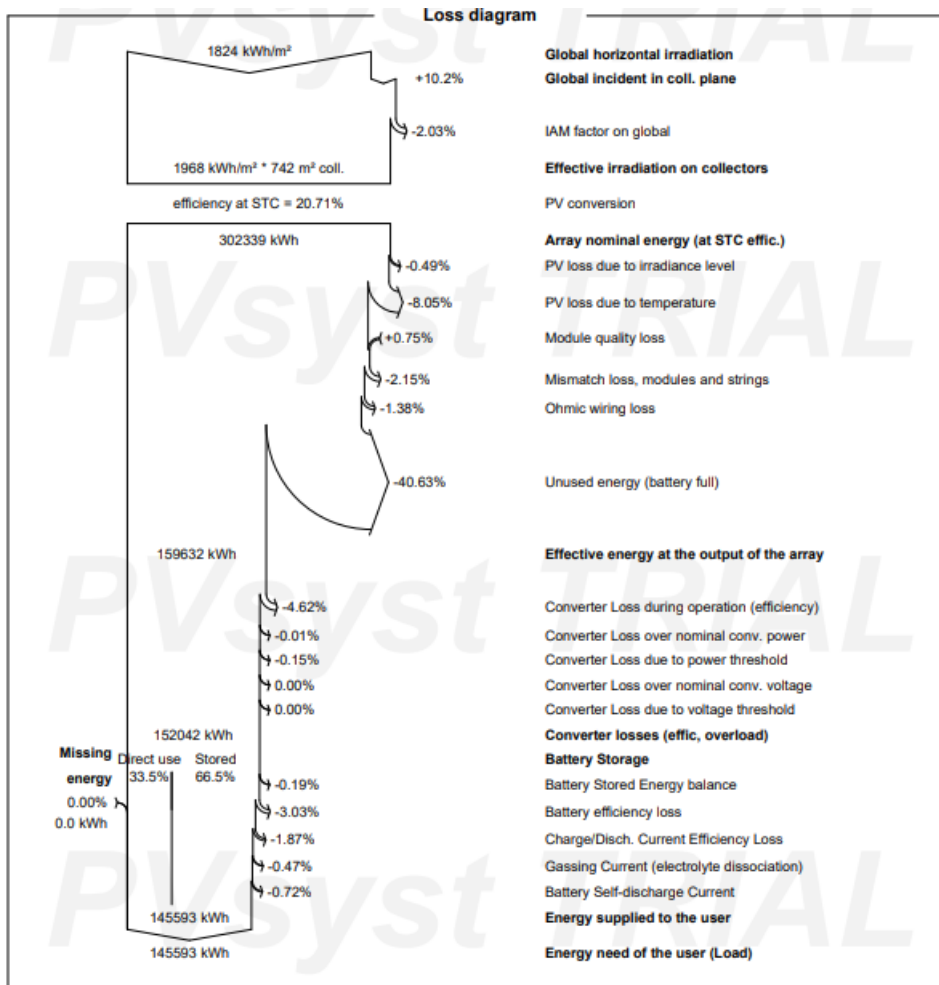


Σημειώνεται ότι δοκιμάστηκε πληθώρα διαστασιολογήσεων, με την παρούσα να προκύπτει με ορισμό της πιθανότητας μη κάλυψης φορτίων στο επίπεδο του 1%. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι τα φορτία μπορούν πάντα να τροφοδοτούνται από το σύστημα με δυο ημέρες αυτονομία, τόσο η εγκατεστημένη σε φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύς όσο και η χωρητικότητα της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας αυξάνονται, με αποτέλεσμα για το σύνολο των μηνών η διαθέσιμη (παραγόμενη και αποθηκευμένη ενέργεια) να επαρκεί ώστε να τροφοδοτήσει τις ιδιοκαταναλώσεις.

Προκειμένου να μην υπάρχει αποκοπή της παραγωγής, οι μπαταρίες θα έπρεπε να ξεπεράσουν σε πλήθος τα 1.000 τεμάχια, σενάριο το οποίο δεν είναι οικονομικά και τεχνικά βιώσιμο. Στα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ότι η παραγωγή αυξάνεται κατά το διάστημα Απριλίου – Σεπτεμβρίου, ωστόσο παράλληλα η απόδοση του συστήματος μειώνεται κατά το ίδιο διάστημα, ως αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας.

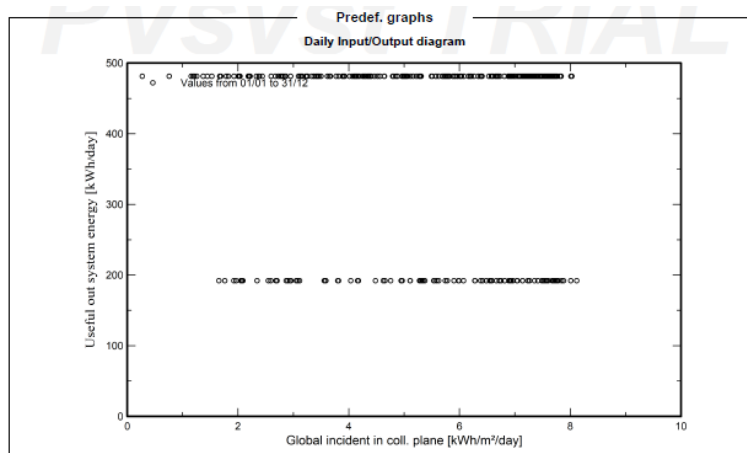
Πιο συγκεκριμένα, αν και υπάρχει περισσότερη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, μικρότερο μέρος της μετατρέπεται σε ηλεκτρική, καθώς τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν μικρότερη απόδοση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Τέλος, στον Πίνακα 15 καταγράφονται αναλυτικά τα κυριότερα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Μεταξύ αυτών αποτυπώνεται ότι οι ιδιοκαταναλώσεις φτάνουν στις 145.593kWh.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα και με το παρακάτω Sankey γράφημα, όπου αποτυπώνονται αναλυτικά οι απώλειες ισχύος και η ροή της ενέργειας, φαίνεται ότι από την ετήσια παραγόμενη ενέργεια των 152.042kWh στην έξοδο των μετατροπέων, 6.449kWh χάνονται ως απώλειες φόρτισης και αυτοεκφόρτισης των μπαταριών. Από τις υπολειπόμενες 145.593kWh, οι 48.774kWh καταναλώνονται ταυτόχρονα με την παραγωγή τους και οι υπόλοιπες 96.819kWh καταναλώνονται ετεροχρονισμένα, μέσω των μπαταριών.



Γράφημα 14: Διάγραμμα απωλειών ενέργειας

Στο Γράφημα 23 αποτυπώνεται η απόδοση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στο γράφημα αποτυπώνεται η σχέση ανάμεσα στη διαθέσιμη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



Γράφημα 15: Διαθέσιμη και παραγόμενη ενέργεια

Σε ό,τι αφορά στο κόστος του μελετώμενου συστήματος, ομοίως ελήφθησαν τιμοκατάλογοι από εταιρείες προμήθειας φωτοβολταϊκού εξοπλισμού, ενώ το κόστος για την εγκατάσταση, ασφάλιση και λειτουργία θεωρήθηκε κατόπιν έρευνας στο διαδίκτυο. Το κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος με το σύστημα έτοιμο να λειτουργήσει ανέρχεται σε 453.050€. Σε ό,τι αφορά στα λειτουργικά κόστη, αυτά υπολογίζονται ίσα με 2.800€, ενώ από τον υπολογισμό της παρούσης αξίας τους με δεδομένο ότι ο πληθωρισμός ανέρχεται σε 5%, τα λειτουργικά κόστη υπολογίζονται σε 5.345€ κατά έτος. Το κόστος της χρησιμοποιούμενης ενέργειας φτάνει στα 0,345€/kWh.

Πίνακας 16: Κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος

Cost of the system			
Installation costs			
Item	Quantity units	Cost EUR	Total EUR
PV modules			
LX-535M/182-144+	287	200.00	57.400.00
Supports for modules	287	10.00	2.870.00
Batteries	816	400.00	326.400.00
Controllers	11	800.00	8.800.00
Other components			
Accessories, fasteners	1	7.000.00	7.000.00
Wiring	1	9.000.00	9.000.00
Monitoring system, display screen	1	2.000.00	2.000.00
Measurement system, pyranometer	1	2.000.00	2.000.00
Surge arrester	1	500.00	500.00
Studies and analysis			
Engineering	1	7.000.00	7.000.00
Installation			
Global installation cost per module	287	30.00	8.610.00
Global installation cost per inverter	11	150.00	1.650.00
Global installation cost per battery	816	20.00	16.320.00
Transport	1	2.500.00	2.500.00
Settings	1	500.00	500.00
Insurance			
Building insurance	1	300.00	300.00
Transport insurance	1	200.00	200.00
		Total	453.050.00
		Depreciable asset	402.470.00
Operating costs			
Item			Total EUR/year
Maintenance			
Salaries			2.500.00
Insurance			
Facilities insurance			300.00
Total (OPEX)			2.800.00
Including inflation (5.00%)			5.345.44
System summary			
Total installation cost		453.050.00 EUR	
Operating costs (incl. inflation 5.00%/year)		5.345.44 EUR/year	
Excess energy (battery full)		109 MWh/year	
Used solar energy		146 MWh/year	
Used energy cost		0.324 EUR/kWh	

Για το μελετώμενο έργο τέθηκε ότι η διάρκεια ζωής του φτάνει στα 25 έτη, ίση με τη διάρκεια των εγγυήσεων των φωτοβολταϊκών πάνελ, ενώ στα παραπάνω λειτουργικά κόστη εισήχθησαν κόστη για αντικατάσταση μπαταριών. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι ο πληθωρισμός θα παραμένει ίσος με 5% καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος, ότι η απόδοσή του θα φθίνει κατά 1% κατά έτος, λόγω γήρανσης του εξοπλισμού, και ότι το επιτόκιο προεξόφλησης ισούται με 7% για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας των μελλοντικών χρηματοροών. Θεωρήθηκε ότι το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 0,30€/kWh προκειμένου να υπολογιστεί η εξοικονόμηση από την αυτονόμηση του καταναλωτή. Το σύστημα δεν φτάνει σε απόσβεση εντός της διάρκειας ζωής του, ενώ η καθαρή παρούσα αξία του μελετώμενου έργου υπολογίζεται ίση με -37.971€. Ο συντελεστής εσωτερικής απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR) υπολογίζεται ίσος με 0%, ενώ η απόδοση της επένδυσης ανέρχεται σε -8,4%.

Πίνακας 17: Οικονομική ανάλυση

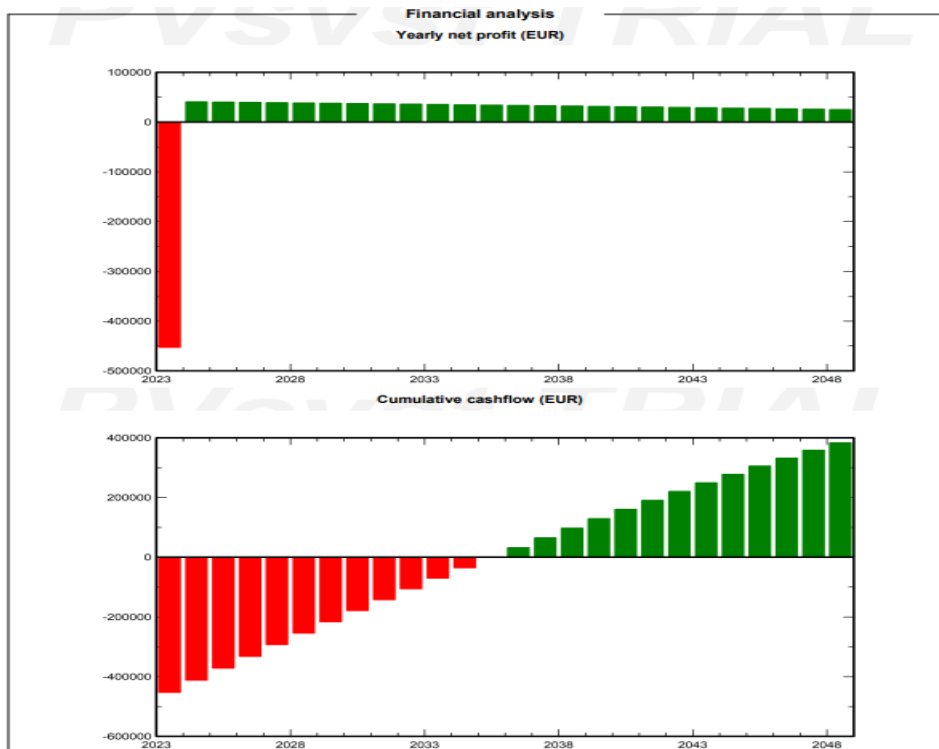
Financial analysis				
Simulation period				
Project lifetime	25 years	Start year	2024	
Income variation over time				
Inflation	5.00 %/year			
Production variation (aging)	-1.00 %/year			
Discount rate	7.00 %/year			
Depreciable assets				
Asset	Depreciation method	Depreciation period (years)	Salvage value (EUR)	Depreciable (EUR)
PV modules				
LX-535M/182-144+	Straight-line	20	0.00	57.400.00
Supports for modules	Straight-line	20	0.00	2.870.00
Batteries	Straight-line	20	0.00	326.400.00
Controllers	Straight-line	20	0.00	8.800.00
Accessories, fasteners	Straight-line	20	0.00	7.000.00
		Total	0.00	402.470.00
Financing				
Own funds	453.050.00 EUR			
Self-consumption				
Consumption tariff	0.3000 EUR/kWh			
Tariff evolution	0.0 %/year			
Return on investment				
Payback period	Unprofitable			
Net present value (NPV)	-37.971.10 EUR			
Internal rate of return (IRR)	0.00 %			
Return on investment (ROI)	-8.4 %			

Η ανάλυση των ετήσιων χρηματοροών παρατίθεται παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υπολογιζόμενα κέρδη από τη λειτουργία του μελετώμενου φωτοβολταϊκού συστήματος προκύπτουν από την εξοικονόμηση προμήθειας ενέργειας από το δίκτυο. Στον πίνακα 18, καταγράφεται ετήσια αύξηση των λειτουργικών εξόδων, λόγω ετήσιου πληθωρισμού 5%.

Πίνακας 18: Πίνακας χρηματοροών

Financial analysis					
Detailed economic results (EUR)					
Year	Own funds	Run. costs	Self-cons. saving	Cumul. profit	% amort.
0	453.050	0	0	-453.050	0.0%
1	0	2.800	43.678	-414.846	8.4%
2	0	2.940	43.241	-379.646	16.2%
3	0	3.087	42.809	-347.221	23.4%
4	0	3.241	42.381	-317.362	29.9%
5	0	3.403	41.957	-289.874	36.0%
6	0	3.574	41.537	-264.577	41.6%
7	0	3.752	41.122	-241.305	46.7%
8	0	3.940	40.711	-219.904	51.5%
9	0	4.137	40.304	-200.232	55.8%
10	0	4.344	39.900	-182.157	59.8%
11	0	4.561	39.501	-165.557	63.5%
12	0	4.789	39.106	-150.320	66.8%
13	0	5.028	38.715	-136.341	69.9%
14	0	5.280	38.328	-123.524	72.7%
15	0	5.544	37.945	-111.780	75.3%
16	0	5.821	37.566	-101.027	77.7%
17	0	6.112	37.190	-91.189	79.9%
18	0	6.418	36.818	-82.194	81.9%
19	0	6.739	36.450	-73.979	83.7%
20	0	7.075	36.085	-66.482	85.3%
21	0	7.429	35.724	-59.649	86.8%
22	0	7.801	35.367	-53.427	88.2%
23	0	8.191	35.014	-47.768	89.5%
24	0	8.600	34.663	-42.630	90.6%
25	0	9.030	34.317	-37.971	91.6%
Total	453.050	133.636	970.429	-37.971	91.6%

Στο Γράφημα 24, γραφήματα παρουσιάζονται τα ετήσια καθαρά κέρδη από τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος (επάνω γράφημα) και οι σωρευτικές ταμειακές ροές από τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος (κάτω γράφημα).

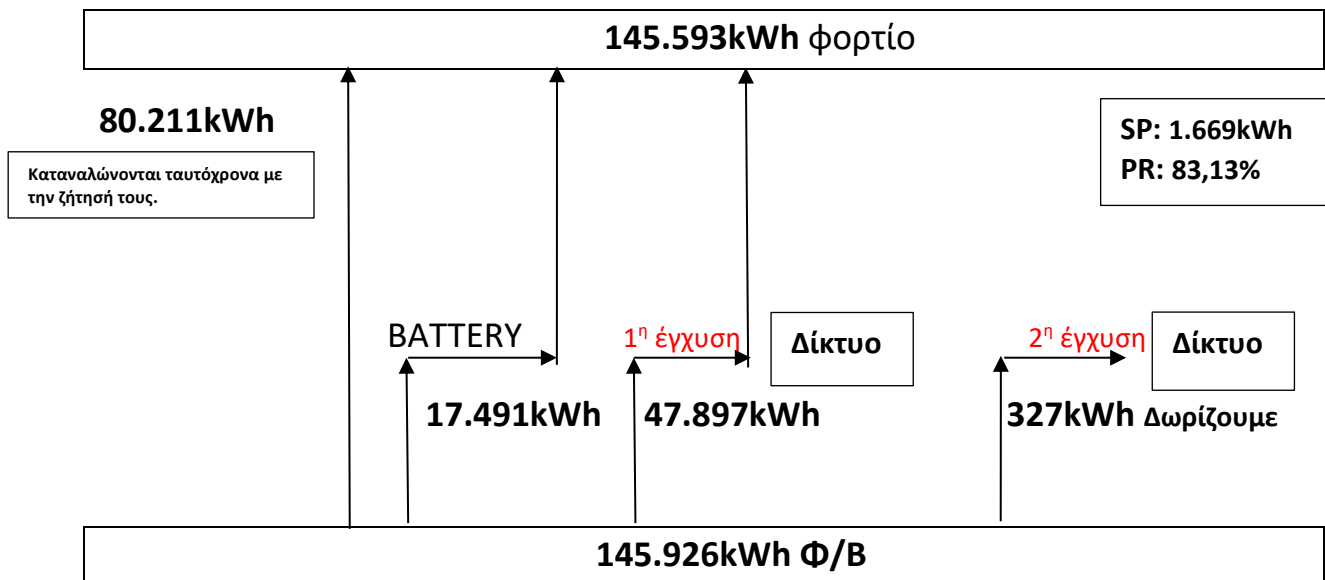


Γράφημα 16: Ετήσια κέρδη και σωρευτικές ταμειακές ροές

6.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Ενεργειακός συμψηφισμός με μπαταρία και με δυνατότητα έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο

Το φωτοβολταϊκό αποτελείται από 165 φωτοβολταϊκά πάνελ και ένα inverter τύπου SUN2000-100KTL-M1 της Huawei. Η ονομαστική ισχύς του inverter είναι 100kW. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι τύπου LX-535M της Luxor Solar με ονομαστική ισχύ 535Wp και είναι μονοκρυσταλλικά. Η ισχύς του συστήματος φτάνει στα 87,5kW.

Ο ειδικός δείκτης απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος φτάνει στις 1,67kWh ανά 1 εγκαταστημένο Wp ή η ειδική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος φτάνει στις 1.669kWh/kWp/έτος. Η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται ίση με 83,14%, ενώ το φωτοβολταϊκό σύστημα υπολογίζεται ότι θα καλύπτει το 67,13% των αναγκών ιδιοκατανάλωσης (Solar Fraction – SF). Επιπλέον, το σύστημα διαθέτει διάταξη αποθήκευσης ενέργειας με ονομαστική τάση 48V, αποτελούμενη από 24 μπαταρίες ονομαστικής τάσης 2V συνδεδεμένες σε σειρά και τρεις τέτοιες συστοιχίες συνδεδεμένες παράλληλα, δηλαδή 72 μπαταρίες συνολικά. Οι μπαταρίες διαθέτουν ονομαστική χωρητικότητα 3.213Ah σε C10 εκφόρτιση και βάθος εκφόρτισης 50%.



Στον Πίνακα 19, παρουσιάζεται η σύνοψη του φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο προσομοιώθηκε στο PVSyst.

Πίνακας 19: Σύνοψη συστήματος

Project summary			
Geographical Site	Situation	Project settings	
Irakleion	Latitude	35.34 °N	Albedo
Greece	Longitude	25.14 °E	0.20
	Altitude	27 m	
	Time zone	UTC+2	
Meteo data			
Irakleion			
Meteonorm 8.1 (2004-2010), Sat=100% - Synthetic			

System summary			
Grid-Connected System	No 3D scene defined, no shadings		
PV Field Orientation	Near Shadings	User's needs	
Fixed plane	No Shadings	Daily profile	
Tilt/Azimuth	30 / 0 °	weekly modulation	
		Average	399 kWh/Day
System information			
PV Array		Inverters	Battery pack
Nb. of modules	165 units	Nb. of units	1 unit
Pnom total	87.5 kWp	Pnom total	100 kWac
		Pnom ratio	0.875
		Storage strategy: Self-consumption	
		Nb. of units	72 units
		Voltage	48 V
		Capacity	3213 Ah

Results summary			
Produced Energy	145926 kWh/year	Specific production	1669 kWh/kWp/year
Used Energy	145593 kWh/year	Perf. Ratio PR	83.13 %
		Solar Fraction SF	67.11 %

Table of contents	
Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Detailed User's needs	5
Main results	6
Loss diagram	7
Predef. graphs	8
Single-line diagram	9
Cost of the system	10
Financial analysis	12
CO ₂ Emission Balance	15

Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά συστήματος

General parameters			
Grid-Connected System		No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation			
Orientation		Sheds configuration	
Fixed plane		No 3D scene defined	
Tilt/Azimuth	30 / 0 °	Models used	
		Transposition	Perez
		Diffuse	Perez, Meteorom with diffuse
		Circumsolar	
Horizon		Near Shadings	
Free Horizon		No Shadings	
		User's needs	
		Daily profile	
		weekly modulation	
		Average	399 kWh/Day
Storage			
Kind	Self-consumption		
Charging strategy		Discharging strategy	
When excess solar power is available		As soon as power is needed	
PV Array Characteristics			
PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	LX-530M/182-144+	Model	SUN2000-100KTL-M1-400Vac
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	530 Wp	Unit Nom. Power	100 kWac
Number of PV modules	165 units	Number of inverters	1 unit
Nominal (STC)	87.5 kWp	Total power	100 kWac
Modules	11 Strings x 15 In series	Operating voltage	200-1000 V
At operating cond. (50°C)		Max. power (=>33°C)	110 kWac
Pmpp	79.6 kWp	Pnom ratio (DC:AC)	0.87
U mpp	552 V	Power sharing within this inverter	
I mpp	144 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	87 kWp	Total power	100 kWac
Total	165 modules	Max. power	110 kWac
Module area	426 m ²	Number of inverters	1 unit
Cell area	392 m ²	Pnom ratio	0.87
Battery Storage			
Battery			
Manufacturer	Generic		
Model	2V 9 RES OPZV 1400		
Battery pack			
Nb. of units	24 in series x 3 in parallel		Battery Pack Characteristics
Discharging min. SOC	50.0 %		Voltage
Stored energy	77.1 kWh		Nominal Capacity
Battery input charger		3213 Ah (C10)	
Model	Generic		Temperature
Max. charg. power	39.0 kWdc		Fixed 20 °C
Max./Euro effic.	97.0/95.0 %		
Battery to Grid inverter			
Model	Generic		
Max. disch. power	38.0 kWac		
Max./Euro effic.	97.0/95.0 %		

Θέτοντας τη μέγιστη δυνατή ισχύ φόρτισης της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας ίση με 39kWdc, όπου επιτυγχάνεται και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης φόρτισης, ο οποίος φτάνει στο 97% ή 95% (διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα αντίστοιχα) και θέτοντας τη μέγιστη ισχύ εκφόρτισης της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας ικανή να καλύψει τη μέγιστη ισχύ του καταναλωτή, ίση με 38kWdc, επιτυγχάνεται και ο μέγιστος βαθμός απόδοσης εκφόρτισης, ο οποίος φτάνει στο 97% ή 95% (διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα αντίστοιχα).

Σε ό,τι αφορά στις απώλειες ισχύος των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ, αυτές υπολογίζονται ίσες με 20W/m²K απουσία ανέμου και υπολογίζονται μηδενικές παρουσία ανέμου. Οι απώλειες των DC καλωδιώσεων υπολογίζονται σε 1,5% σε συνθήκες STC, καθώς η συνολική ωμική αντίσταση των DC καλωδιώσεων υπολογίζεται ίση με 64mΩ. Επιπλέον, υπολογίζεται αρνητική απώλεια (κέρδος) ισχύος της τάξεως του 0,8% λόγω της απόκλισης των

πραγματικών από τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάνελ. Επιπρόσθετα, λόγω της επιλεγείσας διάταξης των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ υπολογίζεται απώλεια ισχύος της τάξης του 0,2%, ενώ λόγω των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πάνελ και για τις κλιματικές συνθήκες στο χώρο εγκατάστασης υπολογίζονται απώλειες ισχύος της τάξης του 2% σε συνθήκες MPP. Τέλος, καθώς μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πάνελ, σημειώνονται επιπρόσθετες απώλειες λόγω αντανάκλασης και διάθλασης, οι οποίες κυμαίνονται από 0% για γωνία πρόσπτωσης 90ο έως και 56% για γωνία πρόσπτωσης 85°. Σε ό,τι αφορά στις απώλειες AC ισχύος, αυτές υπολογίζονται ίσες με 0,40% σε συνθήκες STC από την έξοδο του inverter μέχρι το σημείο όπου η ενέργεια καταναλώνεται, με δεδομένο ότι η γραμμή τροφοδοσίας του inverter είναι διατομής 50mm² ανά φάση και έχει μήκος 20m.

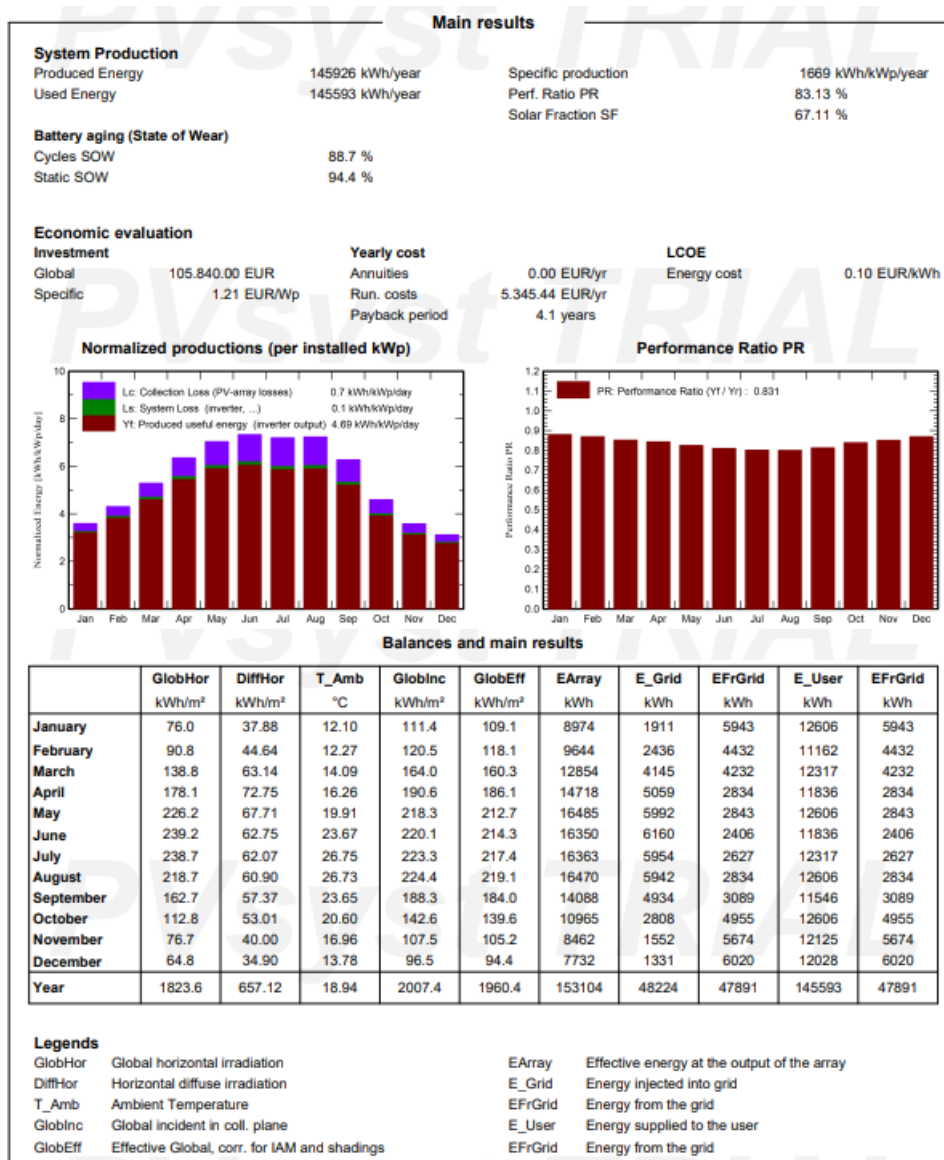
Πίνακας 21: Χαρακτηριστικά συστήματος

Array losses									
Thermal Loss factor			DC wiring losses			Module Quality Loss			
Module temperature according to irradiance			Global array res.			Loss Fraction			
Uc (const) 20.0 W/m ² K			64 mΩ			-0.8 %			
Uv (wind) 0.0 W/m ² K/m/s			Loss Fraction 1.5 % at STC						
Module mismatch losses			Strings Mismatch loss						
Loss Fraction 2.0 % at MPP			Loss Fraction 0.2 %						
IAM loss factor									
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290									
0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°	
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000	
AC wiring losses									
Inv. output line up to injection point									
Inverter voltage 400 Vac tri									
Loss Fraction 0.40 % at STC									
Inverter: SUN2000-100KTL-M1-400Vac									
Wire section (1 Inv.) Copper 1 x 3 x 50 mm ²									
Wires length 20 m									

Κατόπιν εισαγωγής του κόστους του εξοπλισμού, της εγκατάστασης, της μελέτης, της ασφάλισης και της συντήρησης του φωτοβολταϊκού συστήματος, υπολογίζεται ότι το κόστος του μελετώμενου συστήματος ανέρχεται σε 105.640€ ή σε 1,21€/Wp. Τα ετήσια κόστη λειτουργίας ανέρχονται σε 6.109€, ενώ η απόσβεση υπολογίζεται ότι επιτυγχάνεται σε 4,1 έτη. Το κανονικοποιημένο επίπεδο κόστους ενέργειας (LCOE) υπολογίζεται ίσο με 0,10€/kWh.

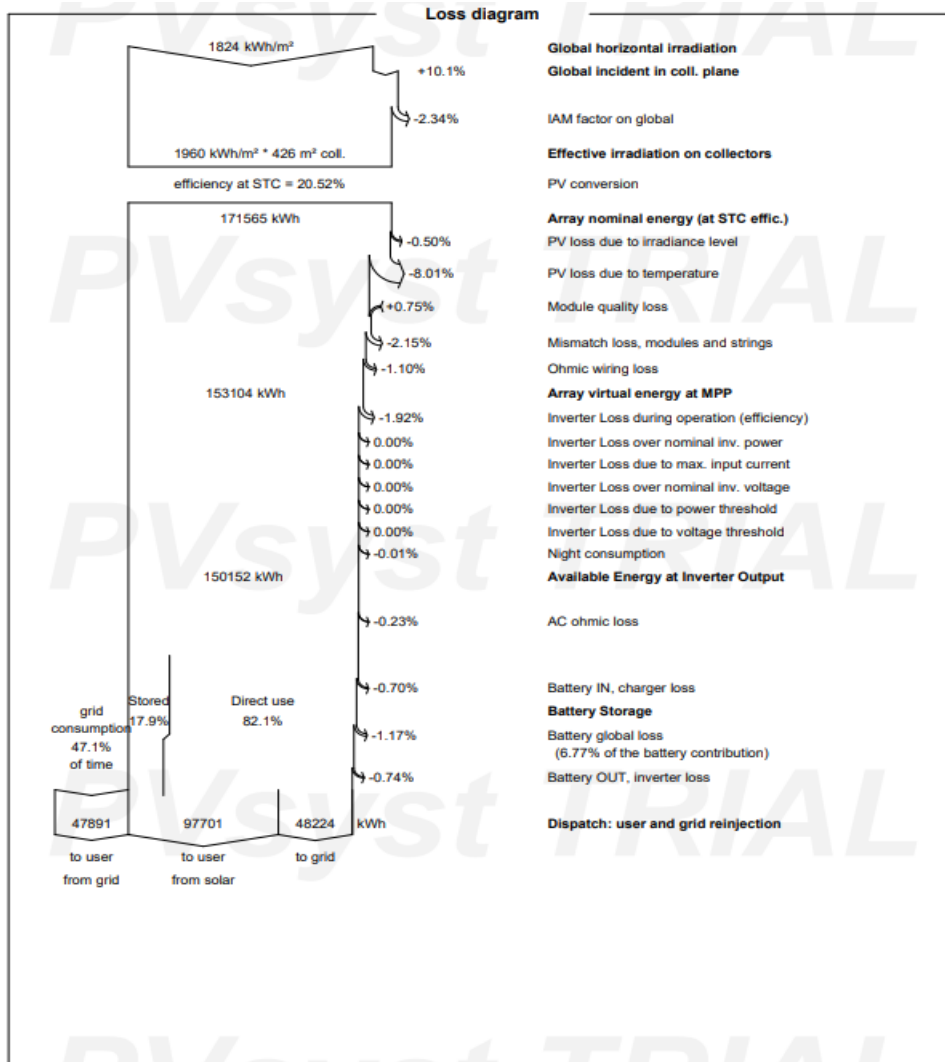
Στον Πίνακα 22, φαίνεται ότι η παραγωγή αυξάνεται κατά το διάστημα Απριλίου – Σεπτεμβρίου, ωστόσο παράλληλα η απόδοση του συστήματος μειώνεται κατά το ίδιο διάστημα, ως αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, αν και υπάρχει περισσότερη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, μικρότερο μέρος της μετατρέπεται σε ηλεκτρική, καθώς τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν μικρότερη απόδοση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Τέλος, στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται αναλυτικά τα κυριότερα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Μεταξύ αυτών αποτυπώνεται ότι οι ιδιοκαταναλώσεις φτάνουν στις 145.593kWh.

Πίνακας 22: Αποτελέσματα προσομοίωσης

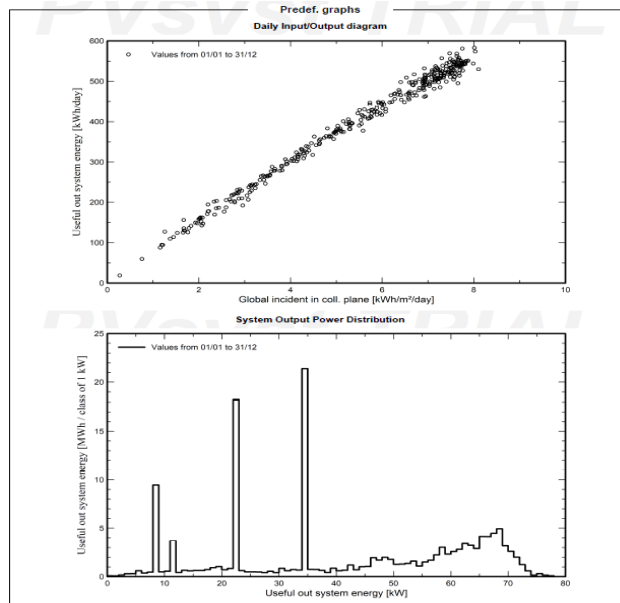


Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα και με το παρακάτω Sankey γράφημα, όπου αποτυπώνονται αναλυτικά οι απώλειες ισχύος και η ροή της ενέργειας, φαίνεται ότι από την ετήσια παραγόμενη ενέργεια των 145.926kWh, οι 80.211kWh καταναλώνονται ταυτόχρονα με τη ζήτησή τους και οι 17.491kWh καταναλώνονται ετεροχρονισμένα, μέσω των μπαταριών, το σύστημα εγχέει στο δίκτυο περίσσειες ενέργειας ύψους 48.224kWh και τροφοδοτείται από το δίκτυο με ενέργεια ύψους 47.862kWh. Ως εκ τούτου, το σύστημα καλύπτει όλες τις ιδιοκαταναλώσεις και «δωρίζει» 327kWh/έτος στο δίκτυο. Εξετάστηκε η δυνατότητα προσομοίωσης με άλλη διαστασιολόγηση η οποία να παράγει ενέργεια ώστε να καλύπτει επακριβώς τις ιδιοκαταναλώσεις, ωστόσο η παρούσα διαστασιολόγηση είναι αυτή που οδηγεί στην ελάχιστη «δωρεά» ενέργεια στο δίκτυο.

Γράφημα 17: Διάγραμμα απωλειών ενέργειας

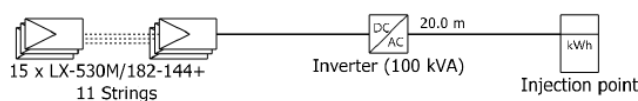


Στο Γράφημα 26, αποτυπώνεται η απόδοση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στο επάνω γράφημα αποτυπώνεται η σχέση ανάμεσα στη διαθέσιμη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Στο κάτω γράφημα αποτυπώνεται η σχέση ανάμεσα στη διαθέσιμη ηλιακή ισχύ και στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



Γράφημα 18: Γραφήματα παραγωγής και κατανομής παραγόμενης ενέργειας

Το μονογραμμικό διάγραμμα του τρίτου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ίδιο με αυτό των δύο προηγούμενων (καθώς το πρόγραμμα προσομοίωσης δεν περιλαμβάνει τις μπαταρίες στο μονογραμμικό διάγραμμα).



Εικόνα 10: Μονογραμμικό διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος

Το κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι μεγαλύτερο από αυτό του πρώτου συστήματος και μικρότερο από αυτό του δεύτερου, καθώς διαθέτει μεν μπαταρίες, αλλά σαφώς λιγότερες από ό,τι το δεύτερο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος ανέρχεται σε 105.640€. Το κανονικοποιημένο ειδικό κόστος ενέργειας υπολογίζεται ίσο με 0,10€/kWh.

Θεωρήθηκε ότι το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 0,30€/kWh και ότι το κέρδος από την ιδιοκατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε 0,15€/kWh. Η τιμή 0,15€/kWh εισήχθη προκειμένου να υπολογιστεί ότι για κάθε kWh η οποία έχει εγχυθεί στο δίκτυο σε περίοδο περίσσειας της παραγωγής ενέργειας και η οποία έχει απορροφηθεί εκ των υστέρων σε περίοδο υστέρησης της παραγωγής χρεώνεται με 0,15€ για μεταφορά και διανομή. Ο συντελεστής εσωτερικής απόδοσης υπολογίζεται ίσος με 28,00%, ενώ η απόδοση της επένδυσης φτάνει στο 200,2%. Η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης φτάνει στις 211,929€.

Πίνακας 23: Κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος

Cost of the system			
Installation costs			
Item	Quantity units	Cost EUR	Total EUR
PV modules			
LX-530M/182-144+	165	200.00	33.000.00
Supports for modules	165	10.00	1.650.00
Inverters			
SUN2000-100KTL-M1-400Vac	1	6.500.00	6.500.00
Batteries	72	400.00	28.800.00
Other components			
Accessories, fasteners	1	5.500.00	5.500.00
Wiring	1	6.300.00	6.300.00
Monitoring system, display screen	1	2.200.00	2.200.00
Measurement system, pyranometer	1	2.000.00	2.000.00
Surge arrester	1	500.00	500.00
Studies and analysis			
Engineering	1	7.000.00	7.000.00
Permitting and other admin. Fees	1	1.000.00	1.000.00
Installation			
Global installation cost per module	165	30.00	4.950.00
Global installation cost per inverter	1	1.000.00	1.000.00
Global installation cost per battery	72	20.00	1.440.00
Transport	1	2.000.00	2.000.00
Settings	1	1.000.00	1.000.00
Grid connection	1	500.00	500.00
Insurance			
Building insurance	1	300.00	300.00
Transport insurance	1	200.00	200.00
		Total	105.840.00
		Depreciable asset	75.450.00
Operating costs			
Item			Total EUR/year
Maintenance			
Provision for inverter replacement			1.300.00
Salaries			600.00
Repairs			400.00
Cleaning			200.00
Insurance			
Facilities insurance			300.00
Total (OPEX)			2.800.00
Including inflation (5.00%)			5.345.44
Cost of the system			
System summary			
Total installation cost	105.840.00 EUR		
Operating costs (incl. inflation 5.00%/year)	5.345.44 EUR/year		
Useful energy from solar	97.7 MWh/year		
Energy sold to the grid	48.2 MWh/year		
Cost of produced energy (LCOE)	0.101 EUR/kWh		

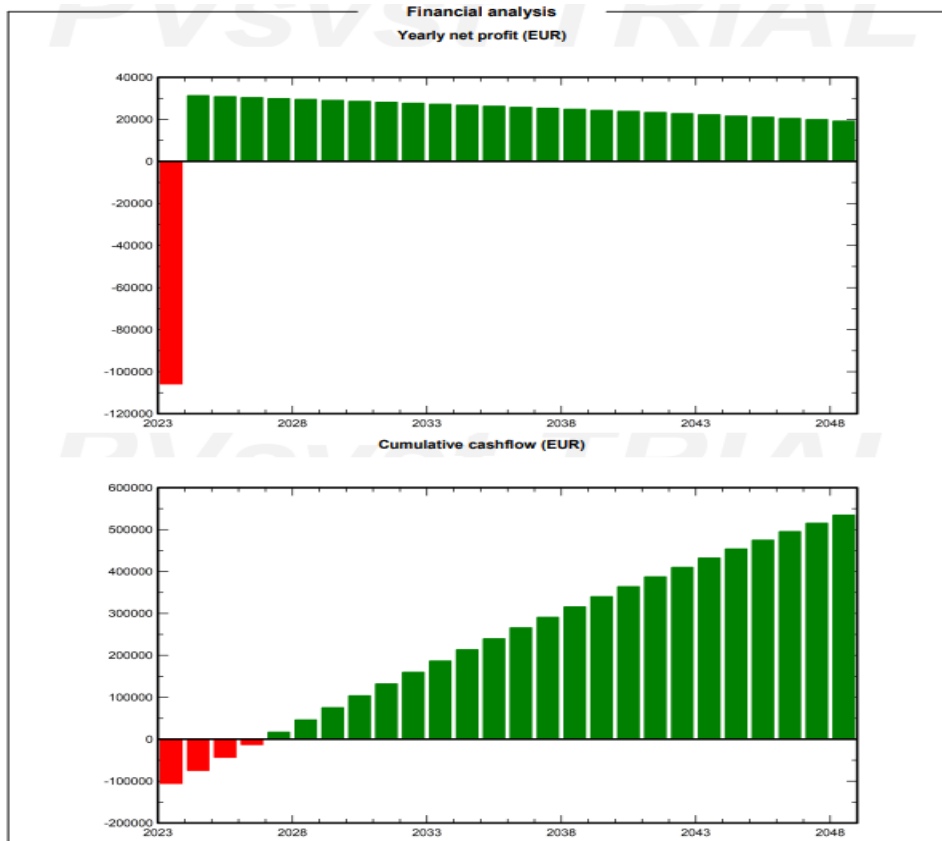
Πίνακας 24: Οικονομική ανάλυση

Financial analysis				
Simulation period				
Project lifetime	25 years Start year 2024			
Income variation over time				
Inflation	5.00 %/year			
Production variation (aging)	-1.00 %/year			
Discount rate	7.00 %/year			
Income dependent expenses				
Income tax rate	22.00 %/year			
Other income tax	0.00 %/year			
Dividends	0.00 %/year			
Depreciable assets				
Asset	Depreciation method	Depreciation period (years)	Salvage value (EUR)	Depreciable (EUR)
PV modules				
LX-530M/182-144+	Straight-line	25	0.00	33.000.00
Supports for modules	Straight-line	25	0.00	1.650.00
Inverters				
SUN2000-100KTL-M1-400Vac	Straight-line	25	0.00	6.500.00
Batteries	Straight-line	25	0.00	28.800.00
Accessories, fasteners	Straight-line	20	0.00	5.500.00
		Total	0.00	75.450.00
Financing				
Own funds		105.840.00 EUR		
Electricity sale				
Feed-in tariff		0.3000 EUR/kWh		
Duration of tariff warranty		25 years		
Annual connection tax		0.00 EUR/kWh		
Annual tariff variation		0.0 %/year		
Feed-in tariff decrease after warranty		0.00 %		
Self-consumption				
Consumption tariff		0.1500 EUR/kWh		
Tariff evolution		0.0 %/year		
Return on investment				
Payback period		4.1 years		
Net present value (NPV)		211.929.32 EUR		
Internal rate of return (IRR)		28.00 %		
Return on investment (ROI)		200.2 %		

Στον Πίνακα 25, παρατίθεται η ανάλυση των ετήσιων και σωρευτικών χρηματοροών, από όπου φαίνεται η ταχύτερη απόσβεση του τρίτου φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο και μελετήθηκε.

Πίνακας 25: Πίνακας χρηματοροών

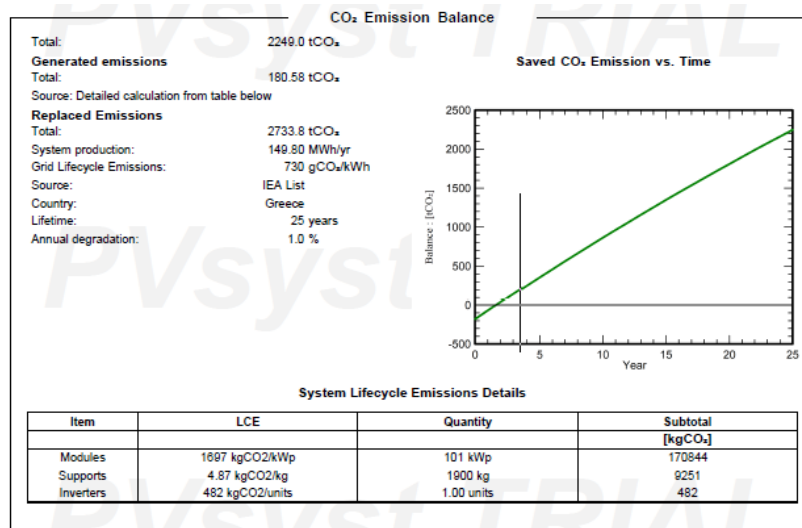
Financial analysis										
Detailed economic results (EUR)										
Year	Electricity sale	Own funds	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Self-cons. saving	Cumul. profit	% amort.
0	0	105.840	0	0	0	0	0	0	-105.840	0.0%
1	14.467	0	2.800	3.073	8.594	1.891	9.777	21.497	-76.613	27.6%
2	14.323	0	2.940	3.073	8.310	1.828	9.554	21.282	-49.679	53.1%
3	14.179	0	3.087	3.073	8.019	1.764	9.328	21.069	-24.866	76.5%
4	14.038	0	3.241	3.073	7.723	1.699	9.097	20.858	-2.013	98.1%
5	13.897	0	3.403	3.073	7.421	1.633	8.861	20.650	19.028	118.0%
6	13.758	0	3.574	3.073	7.112	1.565	8.620	20.443	38.394	136.3%
7	13.621	0	3.752	3.073	6.795	1.495	8.373	20.239	56.212	153.1%
8	13.484	0	3.940	3.073	6.472	1.424	8.121	20.036	72.600	168.6%
9	13.350	0	4.137	3.073	6.140	1.351	7.862	19.836	87.665	182.8%
10	13.216	0	4.344	3.073	5.799	1.276	7.596	19.638	101.510	195.9%
11	13.084	0	4.561	3.073	5.450	1.199	7.324	19.441	114.226	207.9%
12	12.953	0	4.789	3.073	5.091	1.120	7.044	19.247	125.899	219.0%
13	12.824	0	5.028	3.073	4.722	1.039	6.756	19.054	136.610	229.1%
14	12.695	0	5.280	3.073	4.342	955	6.460	18.864	146.431	238.4%
15	12.568	0	5.544	3.073	3.952	869	6.155	18.675	155.431	246.9%
16	12.443	0	5.821	3.073	3.549	781	5.841	18.488	163.672	254.6%
17	12.318	0	6.112	3.073	3.133	689	5.517	18.304	171.213	261.8%
18	12.195	0	6.418	3.073	2.704	595	5.182	18.121	178.107	268.3%
19	12.073	0	6.739	3.073	2.262	498	4.837	17.939	184.405	274.2%
20	11.952	0	7.075	3.073	1.804	397	4.480	17.760	190.152	279.7%
21	11.833	0	7.429	2.798	1.606	353	4.050	17.582	195.377	284.6%
22	11.715	0	7.801	2.798	1.116	245	3.668	17.407	200.134	289.1%
23	11.597	0	8.191	2.798	609	134	3.273	17.232	204.459	293.2%
24	11.481	0	8.600	2.798	83	18	2.863	17.050	208.387	296.9%
25	11.367	0	9.030	2.798	0	0	2.336	16.890	211.929	300.2%
Total	321.431	105.840	133.636	75.450	112.807	24.818	162.978	477.611	211.929	300.2%



Γράφημα 19: Ετήσια κέρδη και σωρευτικές ταμειακές ροές

Το ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα είναι ίδιο με αυτό των δύο προηγούμενων φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία μελετήθηκαν, δηλαδή υπολογίζεται ότι μέχρι το τέλος της διάρκειας ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος θα έχουν «εξοικονομηθεί» 2.249tn CO₂.

Πίνακας 26: Ισοζύγιο εκπομπής ρύπων CO₂



6.4 Συζήτηση

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από τη μελέτη – προσομοίωση τριών φωτοβολταϊκών συστημάτων με όμοιο εξοπλισμό και διαφορετικό τρόπο λειτουργίας. Τα συστήματα που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 85,6kWp χωρίς μπαταρίες με ενεργειακό συμψηφισμό και με δυνατότητα έγχυσης στο δίκτυο, ένα αυτόνομο σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 154kWp με μπαταρίες ονομαστικής χωρητικότητας 1.398,3kWh και ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 87,5kWp με μπαταρίες ονομαστικής χωρητικότητας 77,1kWh με ενεργειακό συμψηφισμό και με δυνατότητα έγχυσης στο δίκτυο.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι η κατασκευή του αυτόνομου συστήματος θα ήταν οικονομικά μη βιώσιμη. Η απαιτούμενη ισχύς σε πάνελ αυξάνει προκειμένου να φορτίσει τις μπαταρίες επαρκώς για να επιτευχθεί αυτονομία δυο ημερών, ενώ οι μπαταρίες αυξάνουν δραματικά το κόστος επένδυσης. Το σύστημα θα μπορούσε να καταστεί βιώσιμο αν ζητούνταν μικρότερη αυτονομία, π.χ. μίας ημέρας, ή/και αν συνδυαζόταν με ακόμη μία πηγή ΑΠΕ, π.χ. ανεμογεννήτρια, προκειμένου να καλύπτει ζητήσεις και να φορτίζει τις μπαταρίες κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε περιόδους νέφωσης. Εναλλακτικά, η δυνατότητα ζεύξης ηλεκτρικής γεννήτριας, π.χ. diesel, θα μπορούσε να μειώσει δραματικά την απαίτηση τόσο για εγκατεστημένη ισχύ σε πάνελ όσο και για τη χωρητικότητα των μπαταριών, καθώς αιχμές της ζήτησης θα μπορούσαν να καλυφθούν από ενέργεια από τη γεννήτρια.

Πίνακας 27: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 3 σεναρίων

Σύστημα	Ισχύς PV (kW)	Ονομαστική χωρητικότητα μπαταριών (kWh)	PR/SC	ΚΠΑ (€)	Απόσβεση (έτη)	Ειδικό κόστος χρησιμοποιούμενης ενέργειας/LCOE (€/kWh)
Ενεργειακός συμψηφισμός χωρίς μπαταρίες με έγχυση ενέργειας στο δίκτυο	85,6		85,52/51,14	192.994	3,2	0,079
Αυτόνομο σύστημα	154	1.398,3	47,2/100	-37.971	-	0,23
Ενεργειακός συμψηφισμός με μπαταρίες με έγχυση ενέργειας στο δίκτυο	87,5	77,1	83,13/67,11	211.929	4,1	0,10

Σε ό,τι αφορά στα δύο διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, προκύπτει ότι αμφότερα είναι οικονομικά βιώσιμα και τεχνικά σκόπιμα. Το σύστημα χωρίς μπαταρίες έχει χαμηλότερο κόστος, μικρότερη καθαρή παρούσα αξία, συντομότερη απόσβεση, ενώ καλύπτει τις ιδιοκαταναλώσεις με μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ σε πάνελ. Το σύστημα με μπαταρίες είναι ομοίως βιώσιμο με μεγαλύτερη απόδοση. Σημειώνεται ωστόσο ότι η προσθήκη μπαταριών οδηγεί σε σημαντική μείωση της ενέργειας που «δωρίζεται» στο δίκτυο, 327kWh/έτος έναντι 1.350kWh/έτος. Επιπλέον, στο σύστημα με μπαταρίες απορροφώνται από το δίκτυο 47.897kWh οι οποίες είχαν παραχθεί ετεροχρονισμένα από το φωτοβολταϊκό έναντι 71.139kWh στο σύστημα χωρίς μπαταρίες. Ως εκ τούτου, βελτιώθηκε σημαντικά ο ταυτοχρονισμός παραγωγής – αποθήκευσης και κατανάλωσης στο σύστημα με αποθήκευση ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τέθηκε χρέωση μεταφοράς και διανομής ίση με 0,15€/kWh για την παραγόμενη ενέργεια η οποία εγχέεται στο δίκτυο, σε περιόδους περίσσειας της παραγωγής, και απορροφάται ετεροχρονισμένα, σε περιόδους υστέρησης της παραγωγής, προκύπτει ότι το σύστημα με τις μπαταρίες αποδίδει καλύτερα οικονομικά σε σχέση με το πρώτο σύστημα χωρίς μπαταρίες γιατί είναι μεγαλύτερη η χρέωση. Το συμπέρασμα της παρούσης αφορά στις συγκεκριμένες ιδιοκαταναλώσεις, ενώ σε περίπτωση όπου η καμπύλη φορτίου ήταν διαφορετική, ειδικά τα σαββατοκύριακα ενδέχεται το τρίτο σύστημα να απέδιδε ακόμα καλύτερα οικονομικά από ό,τι το πρώτο. Σημειώνεται και εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού με μπαταρίες αποδίδουν καλύτερα σε καταναλωτές με μικρές διακυμάνσεις στα φορτία τους από ημέρα σε ημέρα. Όσο αυξάνουν οι διακυμάνσεις, τόσο αυξάνει η ανάγκη για μεγαλύτερες αποθήκες ενέργειας, ως εκ τούτου αυξάνει και το κόστος εγκατάστασης. Στα τρία συστήματα τα οποία προσομοιώθηκαν οι ιδιοκαταναλώσεις για δύο συνεχόμενες ημέρες (σαββατοκύριακο) μειώνονται σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με τις καθημερινές. Ως εκ τούτου, οι μπαταρίες φτάνουν να φορτίσουν εντός των δύο αυτών ημερών, με αποτέλεσμα σημαντικές ποσότητες περισσευούμενης ενέργειας να εγχέονται στο δίκτυο για κατανάλωση τις καθημερινές.

Σε περίπτωση όπου λειτουργήσει σύστημα ανταγωνιστικής τιμής, με επιβάρυνση της τιμής ενέργειας σε ώρες αιχμής, το σύστημα με μπαταρίες προσδωκάται ότι θα απέδιδε ακόμα καλύτερα οικονομικά σε σχέση με το σύστημα χωρίς μπαταρίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ στο αυτόνομο σύστημα απαιτείται κατασκευή αποθήκης ενέργειας με ονομαστική χωρητικότητα 1.398,3kWh, στο διασυνδεδεμένο σύστημα με μπαταρίες η χωρητικότητα των μπαταριών μειώνεται στις μόλις 77,1kWh. Τονίζεται ότι δοκιμάστηκαν διαφορετικά σενάρια για τη διαστασιολόγηση των μπαταριών, με αυτό των 77,1kWh να προκρίνεται προκειμένου

να αποθηκεύεται το μεγαλύτερο δυνατό μέρος της περίσσειας ενέργειας του σαββατοκύριακου και να μην αυξάνεται ο χρόνος απόσβεσης. Εξετάζοντας τις χρεώσεις που προκύπτουν από τη χρήση του δικτύου ως «μπαταρία» παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 288: Ετήσια εξοικονόμηση και ετήσια επιβάρυνση για μεταφορά και διανομή

	Σύστημα 1	Σύστημα 3
Ετεροχρονισμένες καταναλώσεις παραχθείσας ενέργειας στο δίκτυο [kWh/έτος]	71.139	47.897
Χρέωση μεταφοράς και διανομής [€/kWh]	0,15 €	0,15 €
Χρέωση μεταφοράς και διανομής/έτος [€]	10.670,85 €	7.184,55 €
Καταναλώσεις από φβ [kWh]	145.595	145.599
Εξοικονόμηση ανά kWh	0,30 €	0,30 €
Εξοικονόμηση/έτος [€/έτος]	43.678,5 €	43.679,7 €
Εξοικονόμηση/έτος συμπ. χρεώσεων μεταφοράς και διανομής [€/έτος]	33.007,65 €	36.495,15 €

Στον παραπάνω πίνακα εντοπίζεται ο λόγος για τον οποίο το τρίτο σύστημα αποδίδει καλύτερα οικονομικά σε σχέση με το πρώτο. Αν και το πρώτο σύστημα επιτυγχάνει χαμηλότερη ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας από το τρίτο, εντούτοις το κόστος εγκατάστασης του τρίτου, λόγω των μπαταριών και ρυθμιστών φόρτισης οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο απόσβεσης. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο σύστημα με κόστος εγκατάστασης 71.920€ δηλαδή με μικρότερο κόστος εγκατάστασης κατά 32,66% σε σχέση με το τρίτο σύστημα (105.640€) οδηγεί σε εξοικονόμηση 9,56% λιγότερη σε σχέση με το τρίτο σύστημα δηλαδή 3.487,5€. Λαμβάνοντας υπόψη τον πληθωρισμό, το τρίτο σύστημα έχει καλύτερη οικονομική απόδοση. Σε περίπτωση όπου ο πληθωρισμός, άρα και το επιτόκιο προεξόφλησης, ήταν χαμηλότερος από 5%, το τρίτο σύστημα θα έφτανε να έχει ακόμα καλύτερη οικονομική απόδοση από το πρώτο.

Σημειώνεται ότι και τα τρία συστήματα δείχνουν ότι μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες των ιδιοκαταναλώσεων με 100% πράσινη ενέργεια και με τη «δωρεά» ενέργειας στο δίκτυο (για το 1^ο και 3^ο σύστημα) να τείνει στο 0.

Τέλος, σημειώνεται ότι η επιλογή της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε καθεστώς ενεργειακού συμψηφισμού δεν περιορίζει τα συμπεράσματα αποκλειστικά σε φωτοβολταϊκά συστήματα με ενεργειακό συμψηφισμό. Εντούτοις, τα συμπεράσματα αυτά έχουν ισχύ και για φωτοβολταϊκά συστήματα πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (feed-in-tariff). Πιο συγκεκριμένα, καθώς ήδη πραγματοποιούνται κατά καιρούς αποκοπές της

παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, και καθώς η ιδιοκατανάλωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λογίζεται οικονομικά ως «εξοικονόμηση», όπου η τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας εξισώθηκε παραπάνω με την τιμή «εξοικονόμησης» ηλεκτρικής ενέργειας, τα δύο φωτοβολταϊκά συστήματα (1^ο και 3^ο) προσδωκάται ότι θα παράγουν τα ίδια ή αντίστοιχα οικονομικά αποτελέσματα ακόμη και εάν επρόκειτο για φωτοβολταϊκά συστήματα ταρίφας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, έχει προκύψει μια σειρά σημαντικών συμπερασμάτων τα οποία αφορούν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και δη στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Αρχικά, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση και μελέτη τριών φωτοβολταϊκών συστημάτων για την κάλυψη ενός καταναλωτή καταδεικνύεται ότι η προσθήκη διατάξεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα έχει ενδιαφέρον.

Ειδικότερα, όταν πρόκειται για διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία μπορούν να εγχέουν ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο, τα πλεονεκτήματα των διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας μεγιστοποιούνται καθώς η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να διοχετεύεται σε ώρες αιχμής όπου η τιμή της ενέργειας αυξάνει. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία μπορούν να εγχέουν ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά. Ειδικά, όταν πρόκειται για συστήματα ενεργειακού συμψηφισμού, τα πλεονεκτήματα των μπαταριών περιορίζονται αν πρόκειται για καταναλωτές με μεγάλες διακυμάνσεις φορτίου. Όσο μεγαλύτερες οι διακυμάνσεις, τόσο αυξάνει η αναγκαία χωρητικότητα των μπαταριών ώστε να προκύπτει όφελος. Καθώς οι τυχόν περίσσειες ενέργειας εγχέονται στο δίκτυο και καταναλώνονται ετεροχρονισμένα με χρέωση για το δίκτυο μεταφοράς και διανομής (περί τα 0,15€/kWh), τα οφέλη των μπαταριών είναι αρκετά από τη σύγκριση των περιπτώσεων 1 και 3.

Ωστόσο, αν εξετάζονται διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα ταρίφας, τότε γίνεται αντιληπτό ότι η διασύνδεσή τους με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και σε αυξημένη οικονομική απόδοση ειδικά σε σενάρια ωριαίας μεταβολής της τιμής της πωλούμενης ενέργειας. Οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας φαίνεται ότι είναι ικανές να απορροφούν αιχμές ή περίσσειες της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και να τις διοχετεύουν είτε στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είτε τοπικά στην εγκατάσταση προκειμένου να καλυφθούν καταναλώσεις σε διαστήματα κατά τα οποία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υστερεί σε σχέση με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι γεγονός ότι η Ελλάδα, χάρη στο μεγάλο πλήθος ημερών με ηλιοφάνεια που διαθέτει, και χάρη στην υψηλή διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις ημέρες αυτές, παρουσιάζει ένα μεγάλο πλεονέκτημα όσον αφορά στη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ωστόσο, η διείσδυση των ΑΠΕ και ειδικότερα των φωτοβολταϊκών στο ενεργειακό μίγμα της χώρας δεν έχει ακόμα φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα, παρόλο που η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών προσφέρει τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά οφέλη. Στο πλαίσιο αυτό, είναι επιτακτική η ανάγκη για ευνοϊκότερες συνθήκες υλοποίησης επενδυτικών σχεδίων στον τομέα των ΑΠΕ. Η υποστήριξη του δημόσιου και οι ευνοϊκές ρυθμίσεις μπορούν να προωθήσουν την επέκταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παράλληλα, ο κορεσμός και η παλαιότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, σήμερα εισάγουν εμπόδια για την κατασκευή μεγάλου αριθμού φωτοβολταϊκών συστημάτων, εμπόδια τα οποία μπορούν να ξεπεραστούν με την ενσωμάτωση περισσότερων φωτοβολταϊκών συστημάτων με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Οι μονάδες αυτές δεν επιβαρύνουν το δίκτυο κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης με περίσσειες εγγεόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και αντίστροφα μπορούν να το υποστηρίξουν κατά τις ώρες αιχμής.

Επιπλέον, η προώθηση της έρευνας και της τεχνολογικής καινοτομίας στον τομέα αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα, μείωση του κόστους εγκατάστασης και, κατ' επέκταση, μεγαλύτερη ανταγωνιστικότητα των φωτοβολταϊκών στον ενεργειακό τομέα.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα με δυνατότητα αποθήκευσης και έγχυσης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, όχι μόνον επιτρέπουν την μεγαλύτερη αυτονομία των καταναλωτών αλλά και μειώνουν την εξάρτησή τους από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ικανότητα αποθήκευσης και να επαναχρησιμοποιήσης της ενέργεια κατά τις ώρες που η παραγωγή είναι χαμηλή, όπως κατά τη διάρκεια της νύχτας, μετατρέπει τα φωτοβολταϊκά σε μια πραγματικά εναλλακτική λύση για την αλλαγή του ενεργειακού μίγματος και την επικράτηση των ΑΠΕ καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι άφθονη, η επένδυση στην τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι καθοριστική για την εκμετάλλευση του πλήρους δυναμικού των ΑΠΕ. Με την έγχυση της αποθηκευμένης ενέργειας στο δίκτυο, όταν το δίκτυο έχει αρνητικό ισοζύγιο προσφοράς – ζήτησης ενέργειας, επιτρέπεται η διασφάλιση μιας σταθερής και αξιόπιστης παροχής ενέργειας, αντιμετωπίζοντας ταυτόχρονα τις προκλήσεις που προκαλεί η διακύμανση της παραγωγής, π.χ. κατά τις ώρες αιχμής. Συνολικά, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και με δυνατότητα έγχυσης της ενέργειας στο δίκτυο αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά την αξιοπιστία και την ευστάθεια του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η υλοποίηση

επενδυτικών σχεδίων στον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα πρέπει να συνοδεύεται από την προαγωγή της έρευνας και ανάπτυξης, της κατάρτισης των επαγγελματιών του τομέα, καθώς και της ευαισθητοποίησης του κοινού για τα πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας, ώστε ειδικά να καμφθούν και οι αντιστάσεις του κόσμου για την εγκατάσταση έργων ΑΠΕ. Τελικά, στην παρούσα υπογραμμίζεται η ανάγκη για μια στρατηγική προσέγγιση στην ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα, ενσωματώνοντας τεχνολογικές καινοτομίες, επενδυτικές πρωτοβουλίες και κοινωνική ευαισθητοποίηση, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και την επίτευξη των στόχων για τη βιώσιμη ανάπτυξη της χώρας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AL Shaqsi, A., Sopian, K. & Al-Hinai, A., 2020. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy Reports*, Τόμος 6, pp. 288-306.
- Al-Falahi, M., Jayasinghe, S. & Enshaei, H., 2017. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy conversion and management*, Τόμος 143, pp. 252-274.
- Alharbi, F. & Kais, S., 2015. Theoretical limits of photovoltaics efficiency and possible improvements by intuitive approaches learned from photosynthesis and quantum coherence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 43, p. 1073–1089.
- Ali, W. και συν., 2018. Design considerations of stand-alone solar photovoltaic systems. *IEEE International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube)*, November, pp. 1-6.
- Al-Shahri, O. και συν., 2021. Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, Τόμος 284, p. 125465.
- Asif, M., 2022. Decentralization in Energy Sector. Στο: *The 4Ds of Energy Transition: Decarbonization, Decentralization, Decreasing Use and Digitalization*. s.l.:s.n., pp. 287-297.
- Bashir, M. και συν., 2014. Comparison of performance measurements of photovoltaic modules during winter months in Taxila, Pakistan. *International Journal of Photoenergy*, p. 898414.
- Bianchini, A., Gambuti, M., Pellegrini, M. & Saccani, C., 2016. Performance analysis and economic assessment of different photovoltaic technologies based on experimental measurements. *Renewable Energy*, Τόμος 85, p. 1–11.
- Bilal, B. και συν., 2010. Optimal design of a hybrid solar–wind–battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP). *Renewable Energy*, 35(10), pp. 2388-2390.
- Bouraiou, A. και συν., 2015. Analysis and evaluation of the impact of climatic conditions on the photovoltaic modules performance in the desert environment. *Energy Conversion and Management*, Τόμος 106, pp. 1345-1355.

- Brus, L. E., 1984. Electron–electron and electronhole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. *American Institute of Physics*, 80(9), pp. 4403-4409.
- Cañete, C., Carretero, J. & Sidrach-de-Cardona, M., 2014. Energy performance of different photovoltaic module technologies. *Energy*, 65(1), pp. 295-302.
- Carr, A. & Pryor, T., 2004. A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates. *Solar Energy*, 76(1-3), p. 285–294.
- Chatzinikolaou, E. & Rogers, D., 2016. A comparison of grid-connected battery energy storage system designs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(9), pp. 6913-6923.
- Chaurasia, R., Gairola, S. & Pal, Y., 2022. Technical, economic feasibility and sensitivity analysis of solar photovoltaic/battery energy storage off-grid integrated renewable energy system. *Energy Storage*, 4(1), p. e283.
- Chen, C. και συν., 2021. Recent advances in solar energy full spectrum conversion and utilization. *ES Energy & Environment*, Τόμος 11, pp. 3-18.
- Chen, T. και συν., 2020. Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems. *Transactions of Tianjin University*, 26(3), pp. 208-217.
- Climate Action - European Commission. (2015). *2030 climate & energy framework - Climate Action - European Commission*. Διαθέσιμο στο: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en [Πρόσβαση την 28/02/2023].
- Custer, G., 2021. Inverter Protection and Ride-Through: Today's Photovoltaic and Energy Storage Inverters. *IEEE Electrification Magazine*, 9(2), pp. 43-49.
- Deng, D., 2015. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, Τόμος 3, pp. 385-418.
- Diouf, B. & Pode, R., 2015. Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. *Renewable Energy*, Τόμος 76, pp. 375-380.
- Eguren, J., Martínez-Moreno, F., Merodio, P. & Lorenzo, E., 2022. First bifacial PV modules early 1983. *Solar Energy*, Τόμος 243, pp. 327-335.
- Eldahab, Y., Saad, N. & Zekry, A., 2016. Enhancing the design of battery charging controllers for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

Τόμος 58, pp. 646-655.

EnergySage, 2023. Monocrystalline and polycrystalline solar panels: what you need to know. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels> [Πρόσβαση 5 Ιούλιος 2023].

Feldman, D. & Bolinger, M., 2016. On the Path to SunShot: Emerging Opportunities and Challenges in Financing Solar, Berkeley : The National Renewable Energy Laboratory; The Lawrence Berkeley National Laboratory.

Grand View Research, 2022. Battery Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Lead Acid, Li-ion, Nickle Metal Hydride, Ni-cd), By Application (Automotive, Industrial, Portable), By Region, And Segment Forecasts, 2020 - 2027. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/battery-market>

[Πρόσβαση την 18/07/2023]

Green, M. και συν., 2018. Solar cell efficiency tables (version 52). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Τόμος 26, p. 427–436.

Green, M., 2009. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 17(3), pp. 183-189.

Gurung, A. & Qiao, Q., 2018. Solar charging batteries: advances, challenges, and opportunities. Joule, 2(7), pp. 1217-1230.

Hady, A. R., 2017. Modeling and simulation of a micro grid-connected solar PV system. Water Science, pp. 1-10.

Hannan, M. και συν., 2021. Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues. Journal of Energy Storage, Τόμος 42, p. 103023.

Hellenic Association of Photovoltaic Companies (2019) *Greek PV Market Investment Opportunities*. Athens: Helacpo

Hill, C. και συν., 2012. Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation. IEEE Transactions on smart grid, 3(2), pp. 850-857.

Hoppmann, J., Volland, J., Schmidt, T. S. & Hoffmann, V. H., 2014. The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems—A review and a simulation model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 39, pp. 1101-1118.

<https://ec.europa.eu/eurostat/>

<https://helapco.gr/>

<https://ourworldindata.org/energy/country/greece#what-sources-does-the-country-get-its-energy-from>

<https://ypen.gov.gr/energeia/ape/nomothesia/ethniko-plaisio/>

Huang, H. και συν., 2020. Optimization of peer-to-peer power trading in a microgrid with distributed PV and battery energy storage systems. *Sustainability*, 12(3), p. 923.

Izadian, A., Pourtaherian, A. & Motahari, S., 2012. Basic Model and Governing Equation of Solar Cells used in Power and Control Applications. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*, pp. 1483-1487.

Jamil, B. & Bellos, E., 2019. Development of empirical models for estimation of global solar radiation exergy in India. *Journal of Cleaner Production*, Volume 207, pp. 1-16.

Jasim, A., Jasim, B., Baiceanu, F. & Neagu, B., 2023. Optimized sizing of energy management system for off-grid hybrid solar/wind/battery/biogasifier/diesel microgrid system. *Mathematics*, 11(5), p. 1248.

Jayawardena, K. και συν., 2013. Inorganics-in-Organics': recent developments and outlook for 4G polymer solar cells. *Nanoscale*, 5(18), pp. 8411-8427.

Kant, N. & Singh, P., 2022. Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Materials Today: Proceedings*, Τόμος 56, pp. 3460-3470.

Khan, S., Wazeer, I., Almutairi, Z. & Alanazi, M., 2022. Techno-economic analysis of solar photovoltaic powered electrical energy storage (EES) system. *Alexandria Engineering Journal*, 61(9), pp. 6739-6753.

Khezri, R., Mahmoudi, A. & Aki, H., 2022. Optimal planning of solar photovoltaic and

battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 153, p. 111763.

Krichen, M., Basheer, Y., Qaisar, S. & Waqar, A., 2023. A Survey on energy storage: Techniques and challenges. *Energies*, 16(5), p. 2271.

Kumar, P., Malik, N. & Garg, A., 2022. Comparative analysis of solar-battery storage sizing in net metering and zero export systems. *Energy for Sustainable Development*, Τόμος 69, pp. 41-50.

Kuzemko, C., Blondeel, M., Dupont, C. & Brisbois, M., 2022. Russia's war on Ukraine, European energy policy responses & implications for sustainable transformations. *Energy Research & Social Science*, Τόμος 93, p. 102842.

Le, T., Nguyen, T., Bui, D. & Ngo, T., 2023. Optimal sizing of renewable energy storage: A techno-economic analysis of hydrogen, battery and hybrid systems considering degradation and seasonal storage. *Applied Energy*, Τόμος 336, p. 120817.

Lehtola, T. & Zahedi, A., 2019. Solar energy and wind power supply supported by storage technology: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Τόμος 35, pp. 25-31.

Leiren, M. & Reimer, I., 2020. Germany: From feed-in tariffs to greater competition. Στο: *Comparative Renewables Policy; Political, Organizational and European Fields*. s.l.:Routledge , pp. 75-102.

Li, C. και συν., 2015. Comprehensive review of renewable energy curtailment and avoidance: a specific example in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 41, pp. 1067-1079.

Li, G. και συν., 2022. Solar energy utilisation: Current status and roll-out potential. *Applied Thermal Engineering*, Τόμος 209, p. 118285.

Mileva, A., Johnston, J., Nelson, J. & Kammen, D., 2016. Power system balancing for deep decarbonization of the electricity sector. *Applied Energy*, Τόμος 162, pp. 1001-1009.

Mulleriyawage, U. & Shen, W., 2021. Impact of demand side management on optimal sizing of residential battery energy storage system. *Renewable Energy*, Τόμος 172, pp. 1250-1266.

- Novas, N., Garcia, R., Camacho, J. & Alcayde, A., 2021. Advances in solar energy towards efficient and sustainable energy. *Sustainability*, 13(11), p. 6295.
- Nwaigwe, K., Mutabilwa, P. & Dintwa, E., 2019. An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), pp. 629-633.
- Nykqvist, B. & Nilsson, M., 2015. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature climate change*, 5(4), pp. 329-332.
- Obi, M. & Bass, R., 2016. Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 58, pp. 1082-1094.
- Ovaskainen, M., Öörni, J. & Leinonen, A., 2019. Superposed control strategies of a BESS for power exchange and microgrid power quality improvement. 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), pp. 1-6.
- Palizban, O. & Kauhaniemi, K., 2016. Energy storage systems in modern grids—matrix of technologies and applications. *Journal of Energy Storage*, Τόμος 6, p. 248–259.
- Poullikkas, A., Kourtis, G. & Hadjipaschalis, I., 2013. A review of net metering mechanism for electricity renewable energy sources. *International Journal of Energy and Environment*, 4(6), pp. 975-1002.
- Pyrgou, A., Kylili, A. & Fokaides, P., 2016. The future of the Feed-in Tariff (FiT) scheme in Europe: The case of photovoltaics. *Energy Policy*, Τόμος 95, pp. 94-102.
- Ribeyron, P., 2017. Crystalline silicon solar cells: Better than ever. *Nature Energy*, 2(5), pp. 1-2.
- Righini, G. & Enrichi, F., 2020. Solar cells' evolution and perspectives: a short review. *Solar Cells and Light Management*, pp. 1-32.
- Sajn, N., 2016. International Renewable Energy Agency (IRENA), Belgium: EPRS: European Parliamentary Research Service.
- Salas, V. O. E., Barrado, A. & Lazaro, A., 2006. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells* , Τόμος 90, pp. 1555-1578.

- Şen, Z., 2004. Solar energy in progress and future research trends. *Progress in energy and combustion science*, 30(4), pp. 367-416.
- Shafiullah, M., Ahmed, S. & Al-Sulaiman, F., 2022. Grid integration challenges and solution strategies for solar pv systems: A review. *IEEE Access*, Τόμος 10, pp. 52233-52257.
- Shamsi, M. H., 2016. Analysis of an electric Equivalent Circuit Model of a Li-Ion battery to develop algorithms for battery states estimation. *Battery Management System*
- Sikiru, S. και συν., 2022. Recent advances and impact of phase change materials on solar energy: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, Τόμος 53, p. 105200.
- Smil, V. (2017) *Energy: A Beginner's Guide* (e-book). Διαθέσιμο στο: [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=WB69DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=Smil+\(2017\)+&ots=TpaQgIH8wJ&sig=w3wNBabgyHI7IIKM_xyrrC3Elkg&redir_esc=y#v=onepage&q=Smil%20\(2017\)&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=WB69DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=Smil+(2017)+&ots=TpaQgIH8wJ&sig=w3wNBabgyHI7IIKM_xyrrC3Elkg&redir_esc=y#v=onepage&q=Smil%20(2017)&f=false) (Πρόσβαση την 19/02/2023)
- Solar Business Hub, 2020. Monocrystalline silicon wafers market share expected to reach nearly 75 percent in 2020 and continue to grow, ITRPV report finds. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://solarbusinesshub.com/2020/05/08/monocrystalline-silicon-wafers-market-share-expected-to-reach-nearly-75-percent-in-2020-and-continue-to-grow-itrpv-report-finds/> [Πρόσβαση 5 Ιούλιος 2023].
- Solargis, 2019. Solar resource maps of Europe. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe> [Πρόσβαση 3 Ιούλιος 2023].
- Stavarakakis, G.M., Tzanaki, E., Genetzaki, V.I., Anagnostakis, G., Galetakis, G., Grigorakis, E. (2012) A computational methodology for effective bioclimatic-design applications in the urban environment. *Sustainable Cities and Society* 4 (2012) 41–57.
- Taslimi, M., Ahmadi, P., Ashjaee, M. & Rosen, M., 2021. Design and mixed integer linear programming optimization of a solar/battery based Conex for remote areas and various climate zones. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Τόμος 45, p. 101104.
- Velilla, E. και συν., 2019. Outdoor performance of perovskite solar technology: Silicon comparison and competitive advantages at different irradiances. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Τόμος 191, pp. 15-20.

- Vidyanandan, K., 2017. An overview of factors affecting the performance of solar PV systems. *Energy Scan*, 27(28), p. 216.
- Visa, I. και συν., 2016. Comparative analysis of the in-field response of five types of photovoltaic modules. *Renewable Energy*, Τόμος 178-190, p. 95.
- Walker, L., Hischer, I. & Schlueter, A., 2022. Does context matter? Robust building retrofit decision-making for decarbonization across Europe. *Building and Environment*, Τόμος 226, p. 109666.
- Worku, M., 2022. Recent advances in energy storage systems for renewable source grid integration: a comprehensive review. *Sustainability*, 14(10), p. 5985.
- Wurfel, P., 1982. The chemical potential of radiation. *Solid States Physics*, 15(18), pp. 3967-3985.
- Xaxiri, M.I. (2020) "Evaluation of investment of building-applied PV system in industry roof" Postgraduate Dissertation, Master in Business Administration (MBA), School of Social Sciences, HOU.
- Yadav, S. & Yadav, K., 2021. The role of bess and upqc in pv integrated power system for power quality improvement: A brief review. 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC) - IEEE, pp. 594-601.
- Yanamandra, K., Pinisetty, D., Daoud, A. & Gupta, N., 2022. Recycling of li-ion and lead acid batteries: A review. *Journal of the Indian Institute of Science*, pp. 1-15.
- Yang, Y., Bremner, S., Menictas, C. & Kay, M., 2018. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 91, pp. 109-125.
- Yudhistira, R., Khatiwada, D. & Sanchez, F., 2022. A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. *Journal of Cleaner Production*, Τόμος 358, p. 131999.
- Ziras, C., Calearo, L. & Marinelli, M., 2021. The effect of net metering methods on prosumer energy settlements. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Τόμος 27, p. 100519.
- Zohuri, B., 2022. Energy Storage Technologies and Their Role in Renewable Integration and Significance of Thermodynamic Analysis. *Encyclopedia of Energy Storage*,

Τόμος 1, pp. 112-170.

Αγγελόπουλος, Δ. (2019). *Ολοκληρωμένη Μεθοδολογία Προώθησης Επενδύσεων σε Έργα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών. ΕΜΠ

ΑΔΜΗΕ, 2023. Βασικά Στοιχεία. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.admie.gr/systima/perigrafi/basika-stoixeia> [Πρόσβαση 11 Ιούλιος 2023].

Αναγνώστου, Χ. και Αυγουστάκη-Παπαμαστοράκη, Δ. (2012) «Η Πορεία προς την Ενεργειακή Αυτονομία: Εφαρμογή στο Νομό Χανίων (Κρήτη)». Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Δασκαλάκη, Μ. (2020) «ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΣΤΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ». Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Δούκας, Δ. (2018). *ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ*. Ερευνητική Εργασία. Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης. Πολυτεχνική Σχολή. ΑΠΘ

Καλδέλλης, Ι.Κ., Μπουλογιώργου, Δ. & Τριανταφύλλου, Π. (2021α) «Η Επάρκεια των Ενεργειακών Αποθεμάτων του Πλανήτη μας. Πόσο κοντά βρίσκεται η απειλή του Ενεργειακού Χειμώνα;» Διαθέσιμο στο: <https://news.b2green.gr/12113/%CE%B7-%CE%B5%CF%80%CE%AC%CF%81%CE%BA%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CF%8E%CE%BD-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89> (Πρόσβαση την 01/03/2023)

Καλδέλλης, Ι.Κ., Μπουλογιώργου, Δ. & Τριανταφύλλου, Π. (2021β) «Η Εξέλιξη της Κατανάλωσης Ενέργειας του Πλανήτη μας (1965-2020). Πόσο μακριά βρισκόμαστε από μια καθαρή-πράσινη ενεργειακή λύση;» Διαθέσιμο στο: <https://dialogoi.uniwa.gr/articles/i-exelixi-tis-katanalosis-energeias-toy-planiti-mas-1965-2020-poso-makria-vriskomaste-apo-mia-kathari-prasini-energeiaki-lysi/> [Πρόσβαση την 01/03/2023]

Κερούλης, Ε. (2014) «ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑΣ 3 ΤΥΠΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ ΜΕ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΗ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ». Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

Κορωνάιος, Χ. Ι. (2012). ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Διδακτικές Σημειώσεις Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβάλλον και Ανάπτυξη». Αθήνα: ΕΜΠ.

Μανουσάκης, Γ. (2020) «Προτάσεις για κτίρια μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας με αρχιτεκτονικές παρεμβάσεις αξιοποίησης φυσικού φωτισμού και συστήματα ελέγχου τεχνητού φωτισμού – Πιλοτική εφαρμογή στο Άσυλο Ανιάτων». Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ.

Νόμος 4513/2018 (2018) ΦΕΚ Α' 9/23.01.2018.

Παπαδάτος, Π. (2014) «Ανάλυση και Έλεγχος Φωτοβολταϊκού Συστήματος Διασυνδεδεμένου στο Δίκτυο». Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Παπαϊωάννου Γ., Herr, H. & Harterich, M. (2010). *Ήπιες Μορφές Ενέργειας*. Αθήνα: ΙΩΝ.

ΡΑΕ, 2023α. Δίκτυο Διανομής. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.rae.gr/ilektrismos/diktya/diktyo-dianomis-2/> [Πρόσβαση 11 Ιούλιος 2023].

ΡΑΕ, 2023β. Αρχείο μητρώου βεβαιώσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.rae.gr/ape/adeiodotisi-2/adeies-ape/> [Πρόσβαση 5 Αύγουστος 2023].

ΡΑΕ, 2023γ. ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΟ-ΣΗΜΕΙΩΜΑ-ΤΗΣ-ΡΑΕ-ΣΧΕΤΙΚΑ-ΜΕ-ΤΗΝ-ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗ-ΑΠΕ. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.rae.gr/wp-content/uploads/2021/10/%CE%95%CE%9D%CE%97%CE%9C%CE%95%CE%A1%CE%A9%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%9F-%CE%A3%CE%97%CE%9C%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%9C%CE%91-%CE%A4%CE%97%CE%A3-%CE%A1%CE%91%CE%95-%CE%A3%CE%A7%CE%95%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%91-%CE%9C%CE%95> [Πρόσβαση 6 Αύγουστος 2023].

Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, 2022. Μια “ακτινογραφία” της ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών 2010-2022. [Ηλεκτρονικό] Available at: https://helapco.gr/wp-content/uploads/Greek_PV_Market_Snapshot_HELAPCO_23Nov2022-1.pdf [Πρόσβαση 5 Αύγουστος 2023].

ΥΠΕΝ/ΥΔΕΝ/47129/720/2023 (2023) ΦΕΚ Β' 2903/02-05-2023.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) (2019). Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ). Διαθέσιμο στο: <https://ypen.gov.gr/energeia/esek/> [Πρόσβαση την 26/03/2023]