



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υποστήριξη Λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Πάρκων.
Βλάβες και Συντήρηση

Μήττας Κωνσταντίνος

A.M.: HN06371

Επιβλέπων: Στημονιάρης Ζ. Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

THESIS STUDY

Support for the Operation of Photovoltaic Parks.
Damage and Maintenance

Mittas Konstantinos

A.M.: HN06371

Faculty Advisor: Stimoniaris Z. Dimitrios , Assistant Professor

(Υπογραφή)

.....

ΜΗΤΤΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

© 2021 – All rights reserved

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι εκ των σημαντικότερων και ταχέως αναπτυσσόμενων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της σύγχρονης κοινωνίας. Ιδιαίτερα κατά την τελευταία δεκαετία οι εγκαταστάσεις μονάδων φωτοβολταϊκών σε όλο τον κόσμο αυξήθηκαν σημαντικά, συνεισφέροντας στην ενεργειακή τροφοδοσία των περιοχών στις οποίες εγκαθίστανται. Παράλληλα όμως με την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, σημειώθηκαν και ορισμένες δυσλειτουργίες όσον αφορά το τεχνικό σκέλος των συγκεκριμένων μονάδων, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την λειτουργική τους απόδοση, και κατ' επέκταση την ασφάλεια ενεργειακής τροφοδοσίας του τοπικού δικτύου παροχής ηλεκτρισμού. Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση των συνηθέστερων βλαβών που παρουσιάζονται στα συστήματα των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, των επιπτώσεων που αυτές επιφέρουν, καθώς και ορισμένες προληπτικές ενέργειες που δύναται να λάβουν χώρα για τον περιορισμό της συχνότητας εμφάνισης αυτών των τεχνικών δυσλειτουργιών. Στα παρακάτω κεφάλαια συμπεριλαμβάνεται αρχικά μια ανάλυση του τρόπου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων και της κατάστασης που επικρατεί σήμερα στην διεθνή ενεργειακή αγορά, στη συνέχεια αναφέρονται οι συνηθέστερες βλάβες που παρουσιάζονται στις εν λόγω μονάδες, και κατόπιν παρατίθενται μια σειρά από ενέργειες οι οποίες μπορούν να γίνουν ώστε να περιοριστεί η συχνότητα εμφάνισης των συγκεκριμένων βλαβών και να βελτιωθεί κατ' επέκταση η λειτουργικότητά τους.

Λέξεις Κλειδιά: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Φωτοβολταϊκά, Βλάβες, Προληπτική Συντήρηση

ABSTRACT

Photovoltaic systems are one of the most important and rapidly growing renewable energy technologies in our modern society. Especially during the last decade the installed photovoltaic energy units worldwide have been significantly increased, contributing to the energy security of the local communities where they are operating. It is a fact, however, that towards with the rapid increase of using this environmentally friendly technology, some technical issues regarding their operational stability have been noticed by their owners and operators. Such malfunctions negatively affect their energy production capacity and the energy security of the local electricity distribution system. The purpose of this thesis is to make a detailed analysis of the most common technical issues reported in photovoltaic energy systems, their consequences, as well as some preventive measures which can be taken in order to limit their occurrence as much as possible. In the following chapters there is presented an analysis of the photovoltaics technology, the current market situation, followed by the most frequently occurring technical issues. In the last chapter there is presented a list of preventive maintenance work which can significantly reduce the frequency of malfunctions occurrence in these systems, resulting into their operational longevity and reliability in electrical energy production.

Keywords: Renewable Energy Sources, Photovoltaics, , Malfunctions, Preventive Maintenance



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας κατά το έτος 2021. Η ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του καθηγητή μου κ. Στημονιάρη Δημήτριου, Επίκουρου Καθηγητή στην εν λόγω Σχολή. Χρωστάω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την βοήθεια και την υποστήριξη που μου προσέφερε καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Οι γονείς μου υπήρξαν πάντα ένα πολύτιμο στήριγμα για μένα, και τους οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου μέχρι σήμερα.

Κοζάνη, Δεκέμβριος 2021

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	v
Πίνακας Περιεχομένων	vii
Εισαγωγή	112
Κεφάλαιο 1: Γενικά Στοιχεία	13
1.1 Τί είναι τα φωτοβολταϊκά	13
1.2 Ιστορική αναδρομή	15
1.3 Η κατάσταση σήμερα	16
Κεφάλαιο 2: Τεχνική Περιγραφή	20
2.1 Πώς λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά	20
2.2 Ο εξοπλισμός μιας μονάδας φωτοβολταϊκών	21
2.2.1 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο	22
2.2.2 Ο μετατροπέας (inverter)	26
2.2.3 Οι καλωδιώσεις	29
2.2.4 Ο μετρητής ενέργειας	31
2.2.5 Οι συσσωρευτές	32
2.2.6 Συστήματα παρακολούθησης του ήλιου (PV trackers)	34
2.2.7 Ο υποσταθμός μέσης τάσης	37
2.3 Διάρκεια ζωής φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων	48
Κεφάλαιο 3: Βλάβες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	44
3.1 Βλάβες στα πάνελς (πλαίσια)	45
3.1.1 Οι χωμάτινες επικαθίσεις	45
3.1.2 Ο αποχρωματισμός οξικών αιθυλενίου βινυλίου (EVA)	48
3.1.3 Θραύση πλαισίου	50
3.1.4 Η δυνητική επαγόμενη υποβάθμιση (PID)	51
3.2 Βλάβες του αντιστροφέα τάσης (inverter)	52
3.3 Βλάβες στις καλωδιώσεις	54
3.4 Βλάβες στον μετασχηματιστή	57
3.5 Βλάβες στους συσσωρευτές	59
Κεφάλαιο 4: Συντήρηση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	62
4.1 Έλεγχος των πάνελς	63
4.2 Διάγνωση του φαινομένου PID	66
4.3 Έλεγχος του αντιστροφέα τάσης (inverter)	68
4.4 Επιθεώρηση των καλωδίων	68
4.5 Έλεγχος του μετασχηματιστή	70
4.6 Έλεγχος των συσσωρευτών	70
4.7 Η σημασία της θερμογράφησης	71
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	76
Βιβλιογραφία	77

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Μια τυπική συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	14
Εικόνα 2. Η εξέλιξη του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων από το 1975 έως σήμερα.....	16
Εικόνα 3: Η παγκόσμια συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά έτος και περιοχή μεταξύ 2010 – 2020.....	17
Εικόνα 4: Συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανά περιοχή με πρόβλεψη έως το 2022.....	17
Εικόνα 5: Κατανομή εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών ανάλογα με την κατηγορία χρήσης (οικιακά, βιομηχανικά, κτλ)	18
Εικόνα 6: Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων ανά πηγή ενέργειας στην Ελλάδα έως το 2020	19
Εικόνα 7: Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάνελ.....	22
Εικόνα 8: Φωτοβολταϊκές κυψέλες μονοκρυσταλλικού (αριστερά), πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου	23
Εικόνα 9: Φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού, μονοκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου	24
Εικόνα 10: Λειτουργική απεικόνιση του μετατροπέα (inverter) σε μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών	26
Εικόνα 11: Τυπικός μετατροπέας τάσης (inverter) που χρησιμοποιείται σε φωτοβολταϊκά συστήματα.....	28
Εικόνα 12: Καλώδια και βύσματα σύνδεσης φωτοβολταϊκών.....	29
Εικόνα 13: Τμήμα του συστήματος καλωδιώσεων ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	30
Εικόνα 14: Τριφασικός μετρητής ενέργειας για net metering	31
Εικόνα 15: Παράδειγμα συνδεσμολογίας μετρητών ενέργειας σε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών αυτοπαραγωγού ενεργειακού συμψηφισμού	32
Εικόνα 16: Συστοιχία συσσωρευτών για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας	33
Εικόνα 17: Η συνδεσμολογία ενός απλού φωτοβολταϊκού συστήματος με συσσωρευτή, ρυθμιστή φόρτισης και inverter.....	34
Εικόνα 18: Σταθερή βάση στήριξης φωτοβολταϊκού πάνελ.....	35
Εικόνα 19: Κινούμενο σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου.....	35

Εικόνα 20: Συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για το φωτοβολταϊκό πάρκο με σταθερή βάση στήριξης	36
Εικόνα 21: Συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για το φωτοβολταϊκό πάρκο με trackers	37
Εικόνα 22: Μια τυπική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με τον υποσταθμό της μονάδας στο κέντρο	38
Εικόνα 23: Διάταξη τριφασικού μετασχηματιστή ελαίου.....	39
Εικόνα 24: Φωτοβολταϊκό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 1ΜWp με τον υποσταθμό μέσης τάσης στο βάθος	42
Εικόνα 25: Πτώση απόδοσης φωτοβολταϊκών ανάλογα με το στάδιο ζωής τους.....	44
Εικόνα 26. Ζώνες υψηλής συγκέντρωσης σκόνης ανά τον κόσμο	46
Εικόνα 27. Επικαθίσεις σκόνης σε φωτοβολταϊκά πάνελς	47
Εικόνα 28. Χωμάτινες επικαθίσεις και ανεπιθύμητη σκίαση λόγω βλάστησης σε φωτοβολταϊκό	47
Εικόνα 29. Πτώση της απόδοσης λόγω σκίασης σε πάνελ φωτοβολταϊκών.....	48
Εικόνα 30. Πτώση της απόδοσης λόγω επικαθίσεων σκόνης σε πάνελ φωτοβολταϊκών.....	48
Εικόνα 31. Αποχρωματισμός EVA σε πάνελ φωτοβολταϊκών	49
Εικόνα 32. Θραύση γυάλινου πλαισίου φωτοβολταϊκού λόγω χαλαζόπτωσης	50
Εικόνα 33. Θραύση γυάλινου πλαισίου φωτοβολταϊκού λόγω υπερβολικής σύσφιξης βίδας	51
Εικόνα 34. Δυνητική επαγόμενη υποβάθμιση σε φωτοβολταϊκό	52
Εικόνα 35. Η πυρκαγιά στους inverters του φωτοβολταϊκού πάρκου στο Ullum της Αργεντινής	54
Εικόνα 36. Φθαρμένη μόνωση καλωδίωσης σε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών από τρωκτικά	55
Εικόνα 37. Τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις δημιουργίας βολταϊκού τόξου σε καλωδιώσεις φωτοβολταϊκών	56
Εικόνα 38. Πυρκαγιά σε συνδεσμολογία καλωδιώσεων λόγω υπερβολικής σύσφιξης	57
Εικόνα 39. Διαρροή λαδιού σε μετασχηματιστή.....	58
Εικόνα 40. Η ζημιά που προκλήθηκε στο εσωτερικό της μονάδας συσσωρευτών της Arizona Public Service	61
Εικόνα 41. Αποχρωματισμός του αγωγού πάνελ φωτοβολταϊκού λόγω υπερθέρμανσης.....	64
Εικόνα 42: Καθαρισμός των επιφανειών των Φ/Β πλαισίων από τον ιδιοκτήτη τους.....	65

Εικόνα 43. Μηχανικός καθαρισμός των επιφανειών φωτοβολταϊκών πάνελς με χρήση συστήματος ψεκασμού νερού	65
Εικόνα 44. Μηχανικός καθαρισμός των επιφανειών φωτοβολταϊκών πάνελς με χρήση ρομπότ	66
Εικόνα 45. Καμπύλες τάσης-έντασης ενός φωτοβολταϊκού με δυνητική επαγόμενη υποβάθμιση	67
Εικόνα 46. Ηλεκτροφθορίζοντες απεικονίσεις φωτοβολταϊκού πλαισίου	67
Εικόνα 47. Προστασία καλωδιώσεων φωτοβολταϊκών σε κανάλια.....	69
Εικόνα 48. Χρήση προστατευτικού μεταλλικού πλέγματος σε πάνελ φωτοβολταϊκών.....	69
Εικόνα 49. Συσσωρευτές μονάδας φωτοβολταϊκών με έντονα σημάδια διάβρωσης.....	71
Εικόνα 50. Χρήση θερμοκάμερας για θερμογράφηση φωτοβολταϊκής εγκατάστασης	72
Εικόνα 51. Υπερθέρμανση καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος σε inverter λόγω κακής συνδεσμολογίας (χαλαρή σύσφιξη)	73
Εικόνα 52. Εναέρια θερμογράφηση φωτοβολταϊκών με χρήση drones	74

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων ΑΠΕ διασυνδεδεμένου συστήματος 2011	25
Πίνακας 2: Τα μέρη του τριφασικού μετασχηματιστή ελαίου	39
Πίνακας 3. Οι συχνότερες βλάβες που παρουσιάζονται στα πάνελς των φωτοβολταϊκών.....	45
Πίνακας 4. Οι συχνότερες βλάβες που παρουσιάζονται στους αντιστροφείς τάσης των φωτοβολταϊκών	53

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς ο πληθυσμός του πλανήτη συνεχώς αυξάνεται, το ίδιο ισχύει και για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο για την κάλυψη των αναγκών των οικιακών νοικοκυριών, όσο και των βιομηχανιών. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση μεγάλων θερμοηλεκτρικών σταθμών που καταναλώνουν συμβατικά ορυκτά ή πυρηνικά καύσιμα ενέχει σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους, και για τον λόγο αυτό η επιστημονική κοινότητα τις τελευταίες δεκαετίες επικεντρώθηκε στην αξιοποίηση περιβαλλοντικά φιλικών μεθόδων όπως τα φωτοβολταϊκά πάρκα και οι αιολικοί σταθμοί.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα στη Γαλλία, και μετά από χρόνια έρευνας και ανάπτυξης. Η ιστορία των φωτοβολταϊκών ξεκίνησε το 1839 από τον Γάλλο επιστήμονα Becquerel σε ηλικία μόλις 19 ετών. Κάνοντας πειράματα πάνω στις χημικές αντιδράσεις διαφόρων στοιχείων παρατήρησε ότι τα διάφορα μίγματα απέδιδαν μεγαλύτερη ηλεκτρική έξοδο όταν τα εξέθετε στο ηλιακό φως. Το επόμενο βήμα μπροστά έγινε το 1870 όταν ο Γερμανός φυσικός Χερτς μελέτησε το φαινόμενο στα στερεά υλικά και συγκεκριμένα στο Σελήνιο και βρήκε αποδόσεις του υλικού της τάξης του 1 -2 %. Το 1956 έγιναν εμπορικές κατασκευές κυρίως από κρυσταλλικό πυρίτιο. Η χρήση φωτοβολταϊκών γεννητριών άνθισε κατά τη διάρκεια της κρίσης πετρελαίου το 73/74, και αυτό το γεγονός οδήγησε έκτοτε στην παρουσία πολυάριθμων ερευνητικών και αναπτυξιακών έργων.

Στη σύγχρονη εποχή οι μονάδες φωτοβολταϊκών συναντώνται σχεδόν σε όλες τις περιοχές του κόσμου, σε εφαρμογές που κυμαίνονται από μερικά μόλις Watts, έως και μεγάλες μονάδες εγκατεστημένης ισχύος της τάξης των Mega-Watts (MW). Η εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών, καθώς επίσης και την αύξηση της λειτουργικής τους αξιοπιστίας. Υπάρχουν, ωστόσο, ορισμένα τεχνικά ζητήματα που παρατηρήθηκαν τα οποία μπορεί να επηρεάσουν τόσο την ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και τη διάρκεια ζωής τους, τα οποία αξίζουν προσοχής. Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμο, αφού πρώτα γίνει μια ανάλυση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, να αναλυθούν οι σημαντικότερες βλάβες που συναντώνται σε αυτά τα συστήματα, καθώς και των τρόπων αντιμετώπισής τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική επεξήγηση των φωτοβολταϊκών. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει μια ανάλυση της συγκεκριμένης τεχνολογίας παραγωγής ενέργειας και του τρόπου λειτουργίας της, των κατηγοριών συστημάτων φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται, καθώς και της εξέλιξής της τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς και της τρέχουσας κατάστασης όσον αφορά την συνολική εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών μονάδων ανά τον κόσμο.

1.1 Τί είναι τα φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια τεχνολογία η οποία μας δίνει τη δυνατότητα μετατροπής μέρους της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στον πλανήτη μας από τον ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια. Ανήκουν στην κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς για την λειτουργία τους αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία είναι μια καθαρή πηγή ενέργειας και η αξιοποίησή της συνεισφέρει στην ενεργειακή μετάβαση η οποία προωθείται τις τελευταίες δεκαετίες ανά τις χώρες του πλανήτη μας. Συνεπώς, η χρήση των φωτοβολταϊκών δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, και για τον λόγο αυτό η χρήση τους γνωρίζει ιδιαίτερη άνθηση τα τελευταία χρόνια, τόσο σε ατομικό επίπεδο (οικίες), όσο και σε βιομηχανική κλίμακα, όπως για παράδειγμα η εγκατάστασή τους σε βιομηχανικές μονάδες για την βελτίωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος και την ενίσχυση της ενεργειακής τους αυτονομίας.

Ανάλογα με το εάν συνδέονται ή όχι στο τοπικό δίκτυο ηλεκτρισμού, διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά
- Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά παρέχουν ολόκληρη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο τοπικό δίκτυο ή για αυτοκατανάλωση, εφόσον πρόκειται για συστήματα εγκατεστημένα σε οικίες και βιομηχανικά κτίρια. Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα διαθέτουν

συσσωρευτή (μπαταρία) ο οποίος φορτίζεται από την παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά την λειτουργία των φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια της ημέρας, και με τη χρήση ενός μετατροπέα (inverter) το συνεχές ρεύμα (DC) που αποθηκεύεται στον συσσωρευτή μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) 230V, το οποίο είναι κατάλληλο για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών συσκευών εντός του κτιρίου.



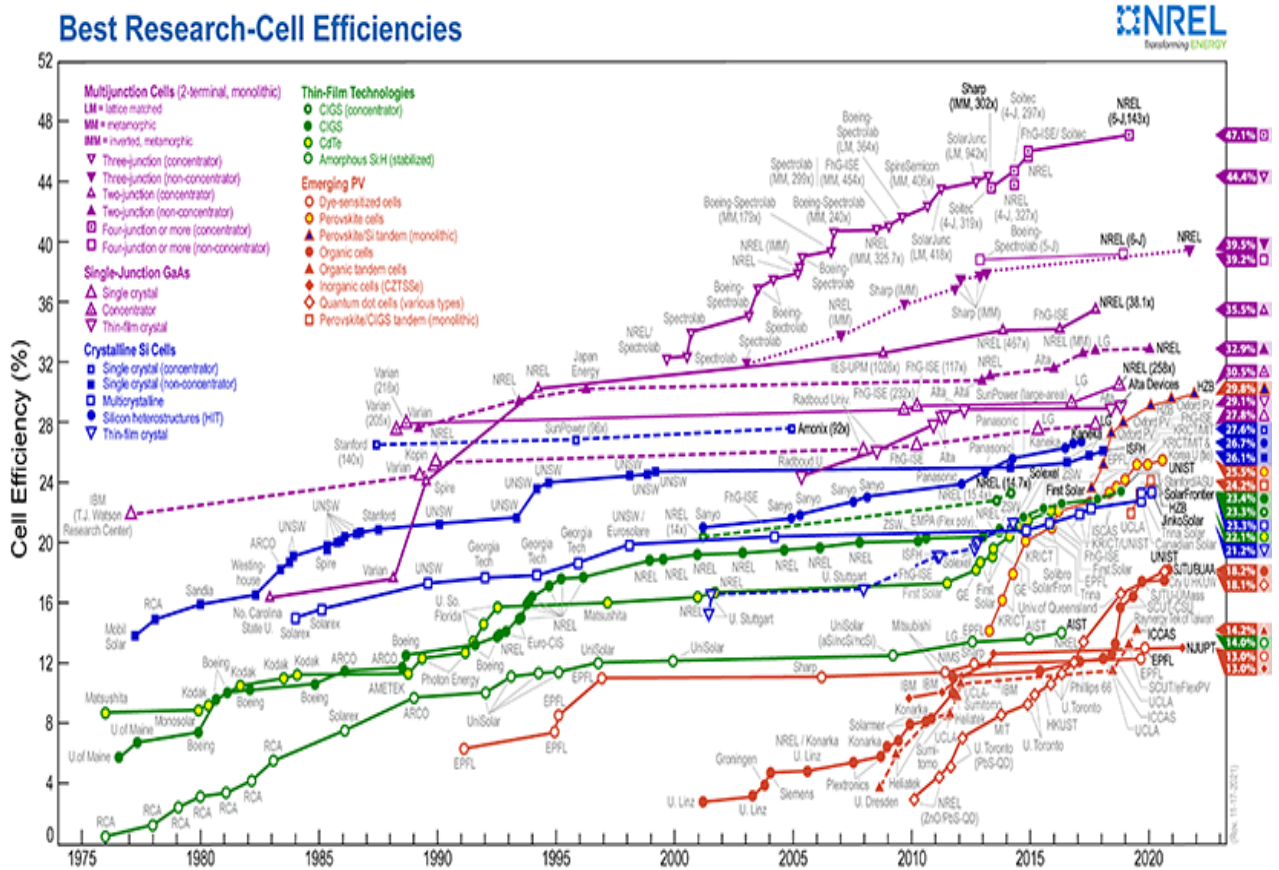
Εικόνα 2: Μια τυπική συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων (Πηγή: *Encyclopédie de l'Énergie* ¹)

Σημαντικό παράγοντα στην αύξηση του αριθμού των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων διαδραμάτισαν (και εξακολουθούν να παίζουν σημαντικό ρόλο) τα επιδοτούμενα προγράμματα τα οποία καλύπτουν μέρος των δαπανών για την αγορά και εγκατάστασή τους, όπως για παράδειγμα στις χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σήμερα η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων έχει σημαντική δυναμική σε παγκόσμια κλίμακα, κάτι που οφείλεται κυρίως στη βελτίωση της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας μας για την συγκεκριμένη τεχνολογία, καθώς και στην πτώση των τιμών αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού λόγω της ανάπτυξης της βιομηχανίας παραγωγής και της βελτίωσης των οικονομιών κλίμακας (economies of scale) στον κλάδο της ηλιακής τεχνολογίας.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Edmond Becquerel το 1839 κατά τη διάρκεια των μελετών των ηλεκτρικών φαινομένων που προκύπτουν ανάμεσα σε δυο ηλεκτρόδια βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες. Την συγκεκριμένη χρονική περίοδο η επιστημονική κοινότητα είχε σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα εστιάσει στο πεδίο έρευνας του ηλεκτρισμού, το οποίο εγκαινιάστηκε το 1800 μετά τις επιστημονικές ανακαλύψεις του A. Volta [4]. Ο Becquerel παρατήρησε πως όταν τα ηλεκτρόδια με επικάλυψη χαλκού ή αλογονιδίων ασημιού βρισκόταν εκτεθειμένα στο ηλιακό φως είχαν την ικανότητα να προάγουν τη ροή ηλεκτρονίων διαμέσου του ηλεκτρολύτη. Μετά από 115 χρόνια επιστημονικής έρευνας και ανάπτυξης δημιουργήθηκε το πρώτο λειτουργικό ηλιακό στοιχείο (solar cell), το οποίο είχε δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος μόλις μερικών Watts. Στα έτη που ακολούθησαν η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύχθηκε περαιτέρω. Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 η χρήση των φωτοβολταϊκών ξεκίνησε να αξιολογείται σε διαστημικές εφαρμογές.

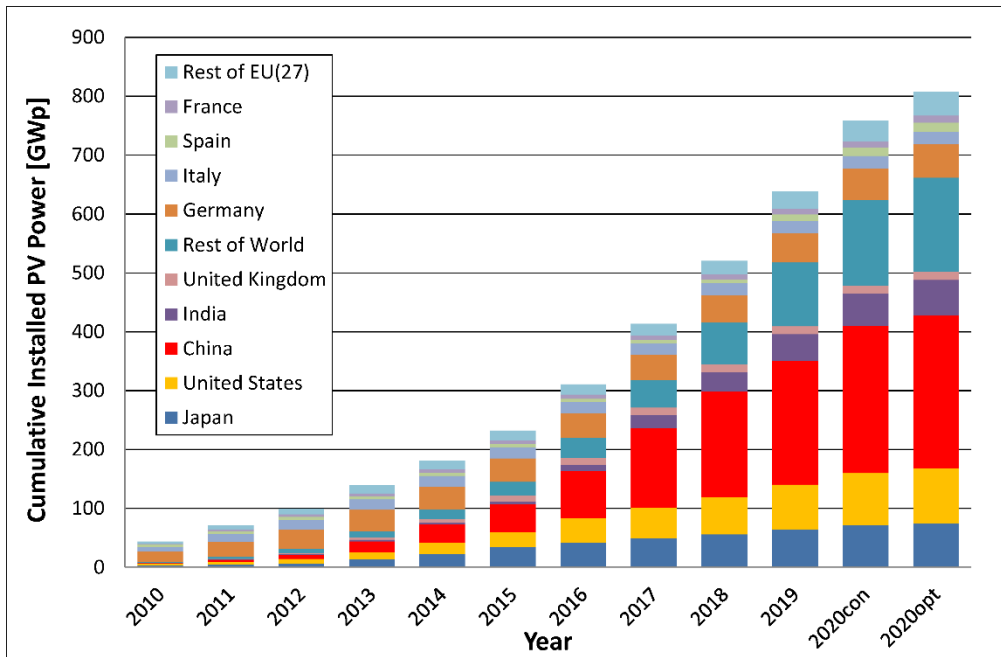
Το 1962 πραγματοποιήθηκε η μεγαλύτερη, έως τότε, φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον κόσμο στην Ιαπωνία από τη Sharp, σε έναν φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος ήταν 242 Watt. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ξεκίνησαν, λοιπόν, να κάνουν την εμφάνιση τους, όμως, εξαιτίας του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα, πάντως, προχωρούσε με αποτέλεσμα η απόδοση των φωτοβολταϊκών να βελτιώνεται συνεχώς. Ο κυριότερος πελάτης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν υπήρξε η NASA. Με την πάροδο του χρόνου το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων άρχισε να μειώνεται, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται όλο και περισσότερες εφαρμογές με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία γίνονταν οικονομικά και ανταγωνιστικά, σε σχέση με τη χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας. Σήμερα έχουμε φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων οι αποδόσεις (σε πειραματικό επίπεδο) αγγίζουν το 47,1% , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 παρακάτω.



Εικόνα 2. Η εξέλιξη του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων από το 1975 έως σήμερα (Πηγή: NREL¹³)

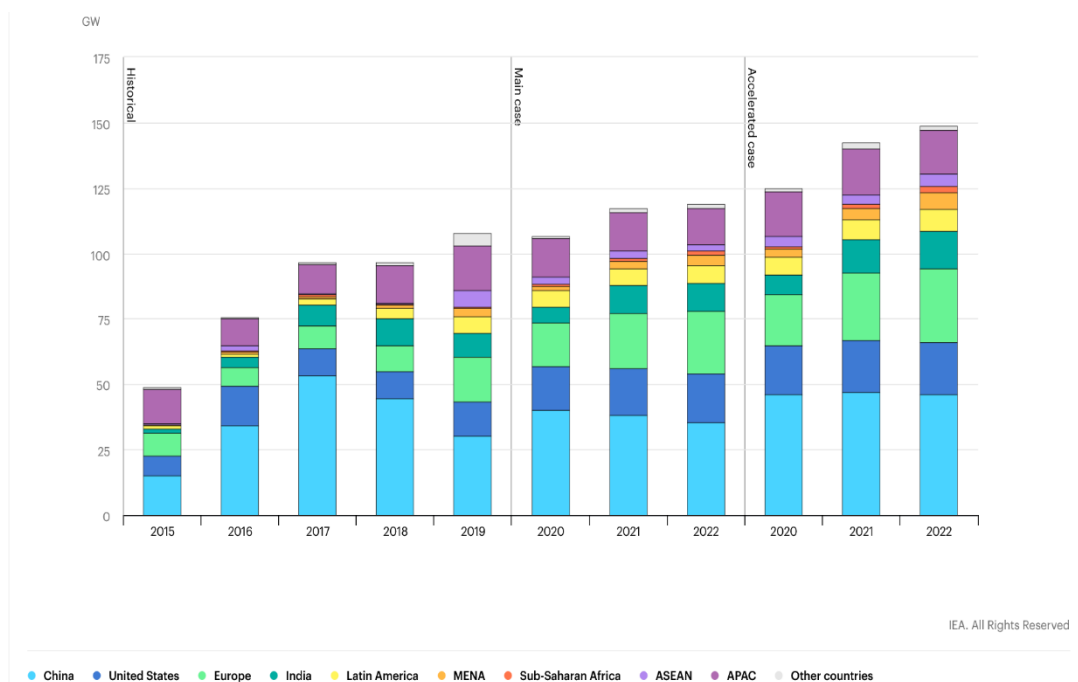
1.3 Η Κατάσταση Σήμερα

Με βάση τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο τέλος του 2020 αγγίζει τα 800 GW, με βάση το αισιόδοξο σενάριο, ή κυμαίνεται κοντά στα 750GW με βάση το συντηρητικό σενάριο [5]. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3 παρακάτω, το σημαντικότερο μερίδιο κατέχει η Κίνα, ενώ η Ιαπωνία, οι ΗΠΑ και οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατέχουν επίσης σημαντικά μερίδια της παγκόσμιας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων.

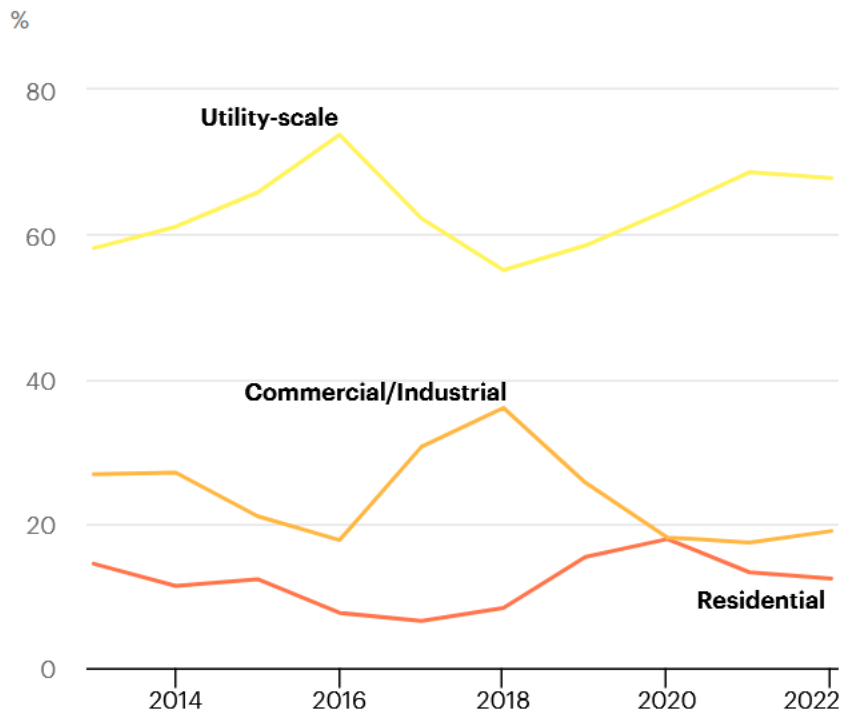


Εικόνα 3: Η παγκόσμια συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά έτος και περιοχή μεταξύ 2010 – 2020 (Πηγή: A. Jäger-Waldau ⁵)

Για την ερχόμενη δεκαετία, οι εκτιμήσεις των ειδικών τείνουν να συμφωνήσουν στο σενάριο μιας παγκόσμιας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος η οποία να αγγίζει το 1 Terra-Watt (TW), σε περίπτωση που επαληθευτούν οι προβλέψεις για μια εγκατεστημένη ισχύ της τάξης των 150GW ανά την υφήλιο για το 2022, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4 παρακάτω.



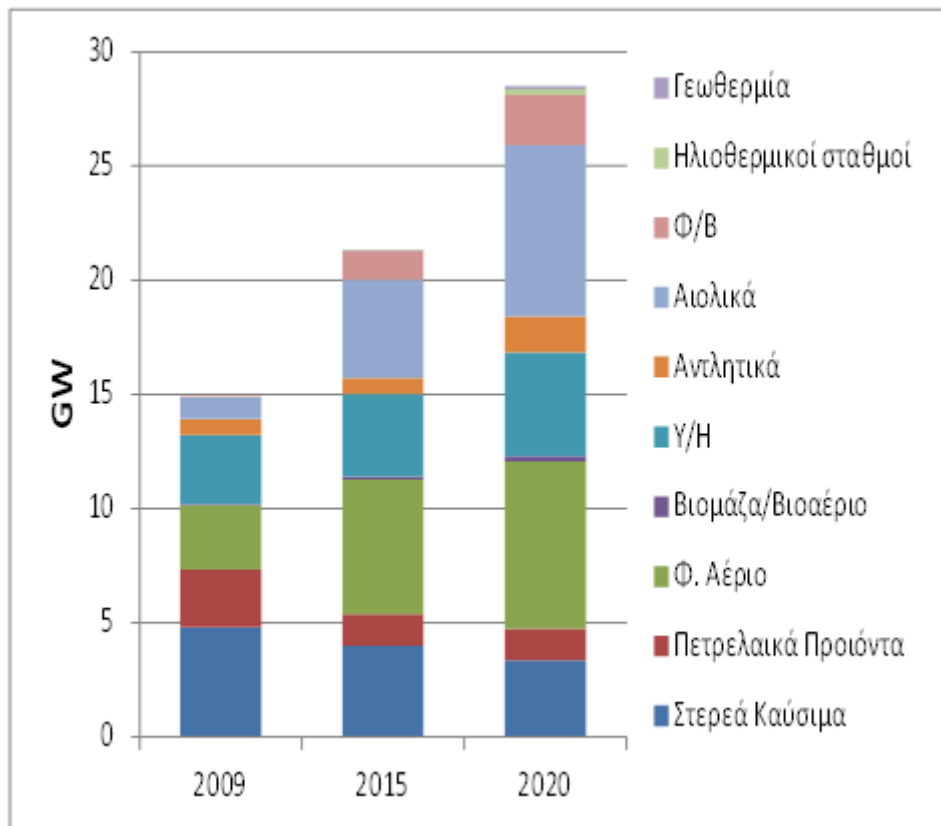
Εικόνα 4: Συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανά περιοχή με πρόβλεψη έως το 2022 (Πηγή: IEA ²)



Εικόνα 5: Κατανομή εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών ανάλογα με την κατηγορία χρήσης (οικιακά, βιομηχανικά, κτλ) (Πηγή: IEA²)

Όσον αφορά την Ελλάδα, η Ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική έως το 2020 επικεντρώθηκε στην επίτευξη τριών επιμέρους στόχων για το σύνολο των Κρατών-Μελών, οι οποίοι αφορούν στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (Οδηγία 2009/29/ΕΚ), στη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας κατά 20% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας (Οδηγία 2009/28/ΕΚ) και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και επίτευξη εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας κατά 20%. Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου ήταν η μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 και η κατά 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση. Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Ν. 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%. Συγκεκριμένα ο στόχος αυτός αφορούσε

σε μια κατά 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε θέρμανση και ψύξη και 10% στις μεταφορές.



Εικόνα 6: Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων ανά πηγή ενέργειας στην Ελλάδα έως το 2020 (Πηγή: ΥΠΕΝ¹²)

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6 παραπάνω, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν κατακτήσει σημαντικό μερίδιο της ελληνικής αγοράς ενέργειας την τελευταία δεκαετία, ως αποτέλεσμα των ευρωπαϊκών προγραμμάτων ενίσχυσης, της αυξημένης περιβαλλοντικής συνείδησης των πολιτών, της βελτίωσης της τεχνολογίας και κατ' επέκταση της λειτουργικής αξιοπιστίας τους, καθώς και της πτώσης του κόστους αγοράς του απαραίτητου εξοπλισμού, ως αποτέλεσμα της αύξησης της βιομηχανικής παραγωγής παγκοσμίως. Οι προβλέψεις για το άμεσο μέλλον όσον αφορά την αγορά των φωτοβολταϊκών είναι ιδιαίτερα ευοίωνες, τόσο για την καθολική εξάπλωση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας παγκοσμίως, όσο και για την καθοδική πορεία στις τιμές των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων, κάτι το οποίο είναι εξαιρετικά χρήσιμο για την καλύτερη κατανόηση και των διάφορων τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια ζωής τους. Η τεχνική περιγραφή περιλαμβάνει την επεξήγηση της λειτουργίας της «καρδιάς» των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, του ηλιακού πάνελ, καθώς και των παρελκόμενων εξαρτημάτων που είναι απαραίτητα για την μονάδα, όπως οι αντιστροφείς τάσης, οι βάσεις στήριξης, των καλωδιώσεων, των μετρητών ενέργειας, των συστημάτων στήριξης και των συσσωρευτών εφόσον αυτοί χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1 Πώς λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά είναι ημιαγωγοί οι οποίοι μετατρέπουν το φως απευθείας σε ηλεκτρισμό. Ημιαγωγός είναι υλικά όπως το γερμάνιο και το πυρίτιο, τα οποία επιτρέπουν να περνά το ηλεκτρικό φορτίο από μέσα τους υπό ορισμένες προϋποθέσεις (αύξηση θερμοκρασίας, πρόσπτωση φωτός). Συνήθως είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο στο οποίο περιέχονται και ίχνη άλλων στοιχείων (π.χ. βόριο, φώσφορος). Ένας ημιαγωγός όπως το πυρίτιο (Si) στην καθαρή κρυσταλλική του μορφή αποτελεί έναν καλό μονωτή. Ωστόσο, όταν έστω και ένα άτομο ανάμεσα στα εκατομμύρια ατόμων αντικατασταθεί από μια πρόσμιξη φωσφόρου, τότε η αγωγιμότητά τους αυξάνεται θεαματικά. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ημιαγωγό τύπου n (negative), καθώς έχουμε παραπάνω ηλεκτρόνια, τα οποία είναι φορείς αρνητικού φορτίου. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που η πρόσμιξη γίνει με άτομο βορίου, αργίλιου ή γάλλιου. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ημιαγωγό τύπου p (positive), καθώς έχουμε επιπλέον οπές στην κρυσταλλική του δομή, οι οποίες δηλώνουν απουσία ηλεκτρονίων, άρα και ύπαρξη θετικού φορτίου. Αυτός ο τρόπος «νόθευσης» της κρυσταλλικής δομής ονομάζεται “doping”.

Το φως είναι αποτέλεσμα της «ιδιόρρυθμης» κίνησης σωματιδίων που ονομάζονται φωτόνια. Όταν μία ακτίνα φωτός προσπίπτει στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού, ένα μέρος από τα

φωτόνια φτάνουν στην διεπιφάνεια των δύο στρωμάτων (θετικού και αρνητικού), απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια στον κρύσταλλο του πυριτίου. Εάν τα φωτόνια έχουν αρκετή ενέργεια (ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες), τα ηλεκτρόνια θα μπορέσουν να κινηθούν εντός του ηλεκτρικού πεδίου της διεπιφάνειας (n, p) και κατόπιν μέσω των ατόμων του πυριτίου στην κυψέλη και στο εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος (δηλαδή έχουμε διαφορά δυναμικού – γνωστή ως ηλεκτρικό ρεύμα).

Καθώς ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, απελευθερώνουν την ενέργειά τους με τη μορφή ωφέλιμου έργου (περιστρέφοντας κινητήρες, ανάβοντας λάμπες, κ.λπ.) και επιστρέφουν στην ηλιακή κυψέλη. Η φωτοβολταϊκή διεργασία πραγματοποιείται απολύτως σε στερεά αγωγή κατάσταση και είναι αυτοτελής. Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη και δεν εκπέμπονται αέριοι ρύποι κατά τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού.

2.2 Ο εξοπλισμός μιας μονάδας φωτοβολταϊκών

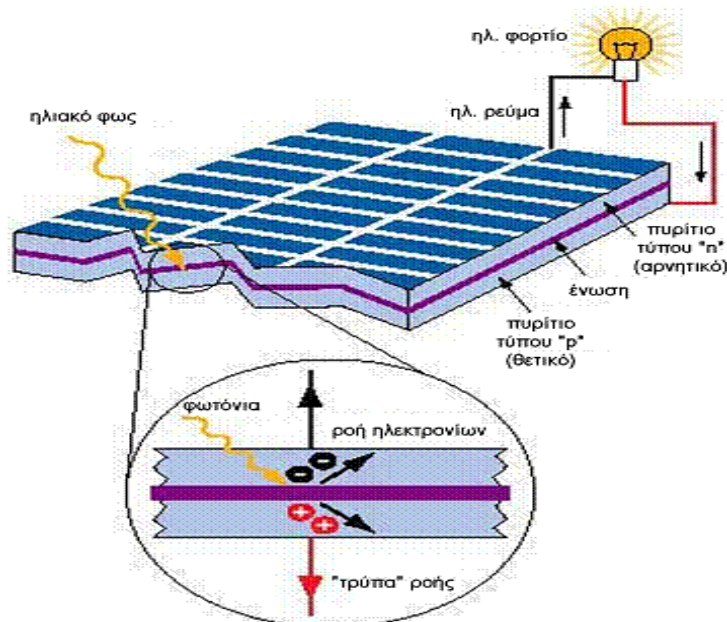
Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (ονομάζεται και «πάνελ» ή «ηλιακή γεννήτρια»)
- Τον αντιστροφέα τάσης (inverter)
- Τους συσσωρευτές (μπαταρίες) για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, εάν πρόκειται για αυτόνομα συστήματα φωτοβολταϊκών.
- Τα συστήματα στήριξης
- Τους μετρητές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

2.2.1 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Η «καρδιά» ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (πάνελ). Πρόκειται για ειδικά διαμορφωμένα πλαίσια τα οποία τοποθετούνται στις στέγες των

οικοδομημάτων ή και στο έδαφος, και με τη βοήθεια των κυψελών που διαθέτουν, η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η τεχνολογία για να πραγματοποιηθεί αυτή η μετατροπή ενέργειας βασίζεται στην διέγερση των φωτονίων τα οποία περιέχονται στις ηλιακές ακτίνες: όταν το φως του ήλιου πέφτει επάνω στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, μέρος αυτής της ακτινοβολίας απορροφάται από το πάνελ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7 παρακάτω. Τα φωτόνια που περιέχονται στις ακτίνες του ήλιου και απορροφώνται από το πάνελ είναι εκείνα που παράγουν ηλεκτρισμό, μετακινώντας τα ηλεκτρόνια του πάνελ σε άλλο σημείο.



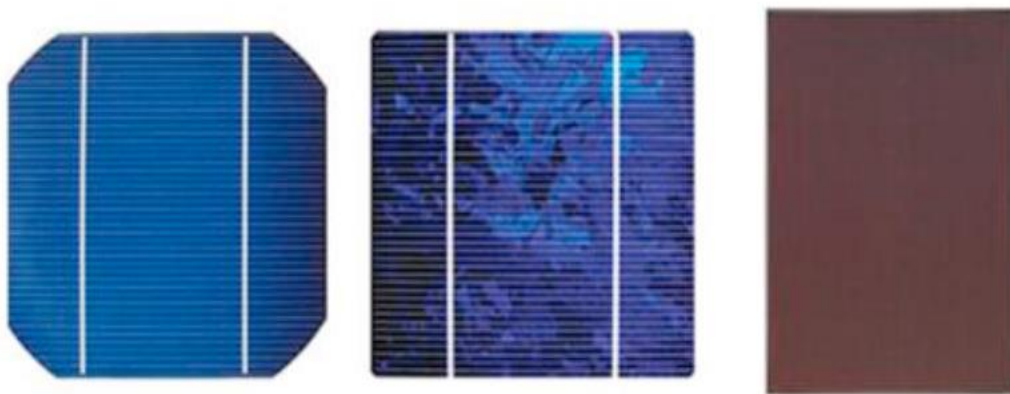
Εικόνα 7: Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάνελ (Πηγή: Γουδουσάκης Σ. ⁷)

Η κάθε κυψέλη ενός φωτοβολταϊκού πάνελ παράγει μια μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύνδεση πολλών ηλιακών κυψελών μεταξύ τους δημιουργεί ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, το οποίο παράγει αθροιστικά μια μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρισμού. Τα μεγέθός τους ποικίλει, ανάλογα με τον προορισμό εφαρμογής τους: στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμα μικρά φωτοβολταϊκά πάνελ για εκπαιδευτικούς ή άλλους σκοπούς, φωτοβολταϊκά στέγης με εγκατεστημένη ισχύ δεκάδων kW, αλλά και μεγάλες μονάδες φωτοβολταϊκών πάνελ εγκατεστημένης ισχύος της τάξης των MW, τα οποία τροφοδοτούν το τοπικό δίκτυο ηλεκτρισμού με σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, υπάρχουν

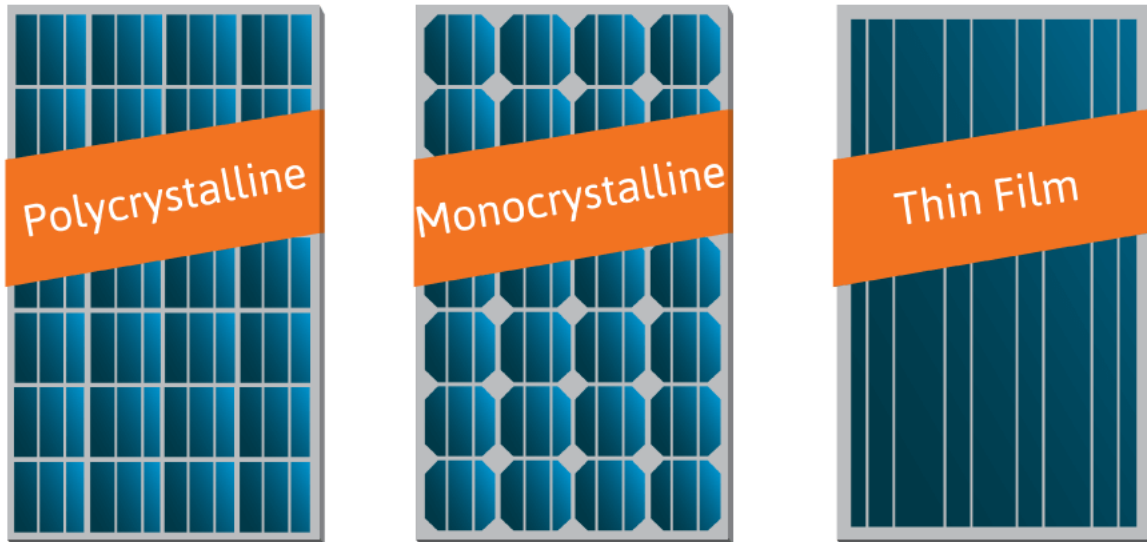
φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία δεν είναι συνδεδεμένα στο τοπικό δίκτυο, τα οποία χαρακτηρίζονται ως «αυτόνομα», και χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν αυτή δεν χρησιμοποιείται.

Όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ κατασκευάζονται με τη χρήση πυριτίου. Η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο κατασκευής, το κόστος και την απόδοσή τους. Το κοινό χαρακτηριστικό τους, ωστόσο, είναι το πυρίτιο το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους. Αρκετά σημαντικό ρόλο στην σύντομη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών διαδραμάτισε η ήδη ανεπτυγμένη τεχνολογία στην βιομηχανία του πυριτίου. Το πυρίτιο είναι ένα από τα λίγα υλικά που παράγονται μαζικά στον κόσμο, και αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Βρίσκεται σε αφθονία στην φύση, είναι φιλικό προς το περιβάλλον και μπορεί να επεξεργαστεί και να μορφοποιηθεί πολύ εύκολα. Οι ιδιότητές του αντέχουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και για αυτό επιτρέπεται η χρήση του σε υπερβολικά δύσκολες καιρικές συνθήκες. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες πάνελ:

- Τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου
- Τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου
- Τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου



Εικόνα 8: Φωτοβολταϊκές κυψέλες μονοκρυσταλλικού (αριστερά), πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου (Πηγή: Taraba et al ⁸)



Εικόνα 9: Φωτοβολταϊκά πάνελ πολυκρυσταλλικού, μονοκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου

Η κάθε κατηγορία από τις παραπάνω έχει τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά της. Οι βασικές διαφορές τους είναι στο κόστος και στον βαθμό απόδοσής τους. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης έως σήμερα ανάμεσα στις υπόλοιπες κατηγορίες και λειτουργούν καλύτερα σε σχέση με τα άλλα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Επίσης, ο βαθμός απόδοσής τους μειώνεται λιγότερο με την πάροδο του χρόνου. Επειδή όμως για την κατασκευή τους απαιτούνται κοστοβόρες διαδικασίες, το κόστος αγοράς τους είναι το μεγαλύτερο, μπορεί όμως να αποσβεστεί σε βάθος χρόνου λόγω της υψηλότερης απόδοσής τους.

Τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν ένα χαρακτηριστικό μπλε χρώμα του οποίου η σκίαση διαφέρει από περιοχή σε περιοχή του πάνελ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9 παραπάνω. Αυτό συμβαίνει διότι το πυρίτιο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του δεν είναι ομοιογενές, αλλά εμφανίζει διαφορετική κρυσταλλική δομή κατά μήκος του πλαισίου, κάτι το οποίο επηρεάζει επίσης και τον βαθμό απόδοσής τους, ο οποίος είναι μειωμένος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά. Για τον λόγο αυτό, η απαιτούμενη επιφάνεια για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1 παρακάτω. Όσο για το κόστος αγοράς τους, αυτό είναι χαμηλότερο σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά, λόγω του χαμηλότερου κόστους κατεργασίας τους για την παραγωγή τους.

Πίνακας 1: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων ΑΠΕ διασυνδεδεμένου συστήματος 2011 (Πηγή: Taraba et al 2019 ⁸)

Κατηγορία Φ/Β	Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου	Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου	Άμορφου Πυριτίου
Μέγιστος Βαθμός Απόδοσης	25%	20.4%	13.4%
Απαιτούμενη επιφάνεια / 1kW παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος	6m ² – 9m ²	8m ² – 9m ²	13m ² – 20m ²

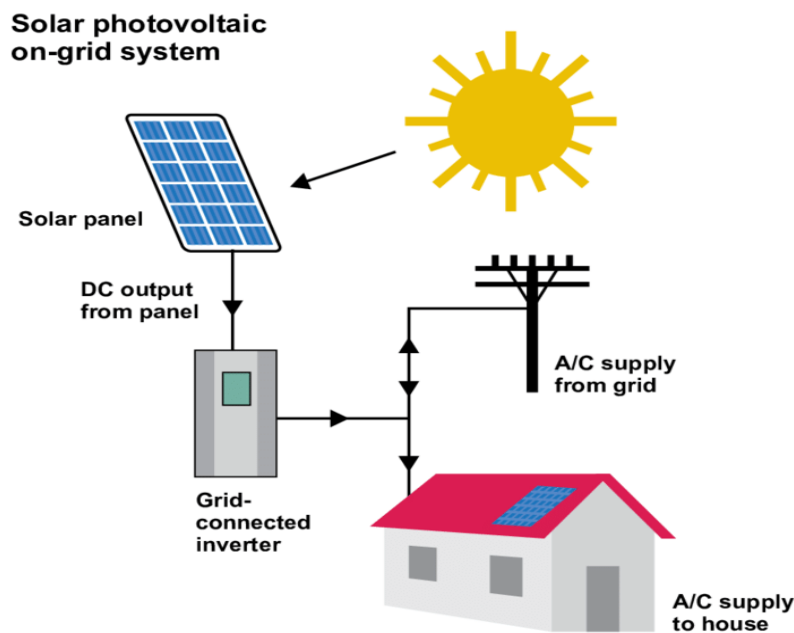
Τα φωτοβολταϊκά πάνελ άμορφου πυριτίου έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τα υπόλοιπα, καθώς και μικρότερη διάρκεια ζωής. Το κόστος τους, ωστόσο, είναι αρκετά χαμηλότερο, καθώς οι μέθοδοι παραγωγής τους είναι ευκολότερες και λιγότερο κοστοβόρες. Επίσης, έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι περισσότερο εύκαμπτα σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία είναι άκαμπτα και περισσότερο εύθραυστα. Λόγω του χαμηλότερου βαθμού απόδοσής τους, δεν προτιμώνται σε εγκαταστάσεις οικιακών.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε εδώ ότι το ρεύμα που παράγεται σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ είναι συνεχές (DC). Το συνεχές ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση μπαταριών, όχι όμως και για την τροφοδότηση των ηλεκτρικών συσκευών μιας οικίας ή μιας εγκατάστασης, καθώς αυτές λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα. Επίσης, η μετάδοση του ηλεκτρισμού στο δίκτυο διανομής για τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις γίνεται με τη μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση του κατάλληλου μηχανισμού αντιστροφής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, του επονομαζόμενου και «αντιστροφή τάσης», ο οποίος θα αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω.

2.2.2 Ο μετατροπέας (inverter)

Όπως αναφέρθηκε και πριν, το ρεύμα που παράγεται σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ είναι συνεχές (DC). Για να μπορέσει να αξιοποιηθεί τόσο από το οικιακό, όσο και από το διασυνδεδεμένο

ηλεκτρικό δίκτυο, είναι απαραίτητη η μετατροπή του σε εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα. Ο μετατροπέας μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης αναλαμβάνει το έργο της μετατροπής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, και αποτελεί ένα από τα πλέον βασικά τμήματά της, καθώς από αυτόν εξαρτάται η λειτουργία και η καλή απόδοση του συστήματος που διαθέτουμε.



Εικόνα 10: Λειτουργική απεικόνιση του μετατροπέα (inverter) σε μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (Πηγή: Scholtz et al 2017¹⁴)

Ο μετατροπέας είναι μια συσκευή με ηλεκτρονικές και ηλεκτρολογικές διατάξεις, η οποία, όπως αναφέρθηκε και πριν, μετατρέπει το παραγόμενο από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, συμβατό με το δίκτυο του ηλεκτρισμού. Πρακτικά, ο μετατροπέας του κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι ο «εγκέφαλος» της εγκατάστασης, αφού μπορεί να «εκμεταλλεύεται» το ρεύμα που παράγεται από τα πάνελς, είτε πρόκειται για αυτόνομο είτε για διασυνδεδεμένο σύστημα. Επιπρόσθετα, ο inverter είναι «υπεύθυνος» για την επιτήρηση όλου του συστήματος. Αν για παράδειγμα εντοπιστεί κάποια βλάβη στο δημόσιο δίκτυο, στη Φ/Β γεννήτρια ή στην καλωδίωση, θα «ενημερώσει» και θα «πράξει» αναλόγως.

Οι μετατροπείς χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τους μονοφασικούς και τους τριφασικούς. Στις οικιακές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι απαίτηση της ΔΕΗ να

παράγεται μονοφασικό ρεύμα (230V) για εγκατεστημένη ισχύ έως 5 kW και τριφασικό για μεγαλύτερες από 5 kW εγκαταστάσεις. Ο τριφασικός inverter είναι αυτός που παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα τριών φάσεων και μονοφασικός είναι αυτός που παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα μίας φάσης. Για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις άνω των 5 kW, ένα έργο μπορεί να υλοποιηθεί είτε με τρεις μονοφασικούς (ένα για κάθε φάση) ή με έναν τριφασικό μετατροπέα.

Ο κάθε μετατροπέας (inverter) χαρακτηρίζεται, μεταξύ άλλων τεχνικών χαρακτηριστικών, και από τον βαθμό απόδοσής του. Ο βαθμός απόδοσης του inverter είναι ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Όσο υψηλότερος είναι ο συντελεστής απόδοσης, τόσο περισσότερο ρεύμα από το ρεύμα που παράγουν τα πάνελ μπορεί να διοχετευθεί στο δημόσιο δίκτυο και τόσο υψηλότερη είναι η απόδοση της ηλιακής εγκατάστασης (οι inverter που κυκλοφορούν έχουν μέγιστο βαθμό απόδοσης από 92% έως 99%) [15]. Όσον αφορά στο θόρυβο λειτουργίας τους, είναι ελάχιστος και αντιληπτός μόνο σε πολύ κοντινή απόσταση. Ακούγεται περίπου όπως ένας σταθερός Η/Υ. Ουσιαστικά ακούμε το θόρυβο των μικρών ανεμιστήρων που χρησιμοποιούνται για την ψύξη.

Όπως και πολλά από τα ηλεκτρονικά μηχανήματα που χρησιμοποιούμε καθημερινά, έτσι και οι inverters προβάλλουν μηνύματα σφάλματος, είτε γραπτά στις οθόνες τους είτε με ενδεικτικές λυχνίες. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα με κατάλληλο εξοπλισμό να «βλέπουμε» από μακριά τον inverter και τις ενδείξεις του. Αυτό γίνεται, είτε μέσω διαδικτύου (Internet) είτε μέσω GSM modem (τεχνολογία κινητού τηλεφώνου). Έτσι και τα μηνύματα λάθους αλλά και η καταγραφή της απόδοσης, είναι διαθέσιμα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, όπου και αν βρισκόμαστε.



Εικόνα 11: Τυπικός μετατροπέας τάσης (inverter) που χρησιμοποιείται σε φωτοβολταϊκά συστήματα

Όσον αφορά την μέση διάρκεια ζωής ενός μετατροπέα, σχεδόν όλες οι εταιρείες μετατροπέων έχουν κατασκευάσει τα προϊόντα τους έτσι, ώστε να λειτουργούν σε όλη τη διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι μεγάλες εταιρείες του χώρου και οι πιο γνωστές, υποστηρίζουν ότι τα προϊόντα τους λειτουργούν για περισσότερα από 25 χρόνια στο μέγιστο βαθμό απόδοσης ακόμα και σε ακραίες συνθήκες (χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες και όταν βρίσκονται σε μη κλειστούς χώρους). Τέλος, όσον αφορά στις εγγυήσεις που δίνονται, συναντούμε χρονικά διαστήματα από 5 έτη και πάνω, με δυνατότητα επέκτασης σε αρκετές περιπτώσεις.

Ως προς τις τεχνολογικές εξελίξεις, σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές, παρουσιάζουν συνεχώς νέους εξελιγμένους inverters, οι οποίοι εμφανίζουν καλύτερες αποδόσεις και περισσότερες δυνατότητες, με αποτέλεσμα κάθε χρόνο οι inverters που κυκλοφορούν στην αγορά να είναι καλύτεροι από τους προηγούμενους. Εδώ και 2-3 χρόνια, έχουν παρουσιαστεί στην αγορά inverters που διαθέτουν ξεχωριστά συστήματα ελέγχου (power boxes) για κάθε πάνελ, με αποτέλεσμα ο inverter να μπορεί να ελέγχει ξεχωριστά την παραγωγή του κάθε πάνελ και έτσι να επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση του συστήματος. Μία επίσης υποσχόμενη εξέλιξη αποτελούν οι micro-inverters, δηλ. μικροί μετατροπείς που τοποθετούνται στο πίσω μέρος κάθε πάνελ. Οι micro-inverters επιτυγχάνουν καλύτερες αποδόσεις γιατί μετατρέπουν επί τόπου το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και έτσι δεν σημειώνονται απώλειες από την μεταφορά του μέσω καλωδίων, πράγμα που συμβαίνει στους συμβατικούς inverters.

Εξίσου απαραίτητα με τα πάνελ και τον αντιστροφέα τάσης για την λειτουργία μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών είναι και τα υπόλοιπα μέρη τα οποία απαρτίζουν το συγκεκριμένο σύστημα, όπως για παράδειγμα οι καλωδιώσεις, τα συστήματα στήριξης, τα προστατευτικά υπέρτασης, οι διακόπτες, ο μετρητής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ή και οι συσσωρευτές, εφόσον αυτοί χρησιμοποιούνται σε μια εγκατάσταση για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, υπάρχουν και μονάδες φωτοβολταϊκών με κινούμενους/περιστρεφόμενους μηχανισμούς προσανατολισμού στην κατεύθυνση του ήλιου, ακόμα και συστήματα αυτόματης ψύξης ή και αυτόματου καθαρισμού. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια ανάλυση και επεξήγηση των υποσυστημάτων τα οποία αποτελούν τον βοηθητικό εξοπλισμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

2.2.3 Οι καλωδιώσεις

Η επιλογή καλωδιώσεων στα φωτοβολταϊκά είναι ένα πολύ κρίσιμο μέρος της σχεδίασης. Ο τύπος και η διατομή του καλωδίου πέρα από τη μακροβιότητα και την απόδοση ενός συστήματος φωτοβολταϊκών επηρεάζει ουσιαστικά την ασφάλεια του χώρου εγκατάστασης, του κτιρίου, εφόσον πρόκειται για οικιακά φωτοβολταϊκά, και των χρηστών. Το χαρακτηριστικό δε των φωτοβολταϊκών πλαισίων να παράγουν ρεύμα αδιάκοπα όσο φωτίζονται τα καθιστά ιδιαίτερος επικίνδυνα και δύσκολα στην κατάσβεση αν προκληθεί πυρκαγιά. Για τον λόγο αυτό είναι εξαιρετικής σημασίας η λήψη μέτρων για την αποφυγή εκδήλωσης πυρκαγιάς.



Εικόνα 12: Καλώδια και βύσματα σύνδεσης φωτοβολταϊκών (Πηγή: Olympic Engineering¹⁶)

Ο τύπος των καλωδίων που επιλέγεται για τον κλάδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ειδικός, με διπλή μόνωση, άκαυστα υλικά, ανθεκτικά σε προσβολή από τρωκτικά, ανθεκτικά σε ακτίνες ηλίου, σε θερμοκρασίες πάνω από 120°C, και γενικά σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται στον κλάδο των συσσωρευτών (εφόσον έχουμε και συσσωρευτές για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στην εγκατάσταση), θα πρέπει παρομοίως να είναι άκαυστα, και κατάλληλης διατομής. Επίσης, εξαιρετικής σημασίας είναι και η ποιότητα των βυσμάτων DC που θα χρησιμοποιηθούν σε μια εγκατάσταση για τη σύνδεση των καλωδιώσεων φωτοβολταϊκών. Αυτά θα πρέπει να είναι επίσης μεγάλης αντοχής, με μια μέση διάρκεια ζωής να κυμαίνεται γύρω στα 25 χρόνια, να είναι αδιάβροχα, κατάλληλα για χρήση

τόσο σε εξωτερικό, όσο και σε εσωτερικό χώρο, και με μικρή αντίσταση στο ρεύμα (χαμηλότερη από 0.3 mΩ).



Εικόνα 13: Τμήμα του συστήματος καλωδιώσεων ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

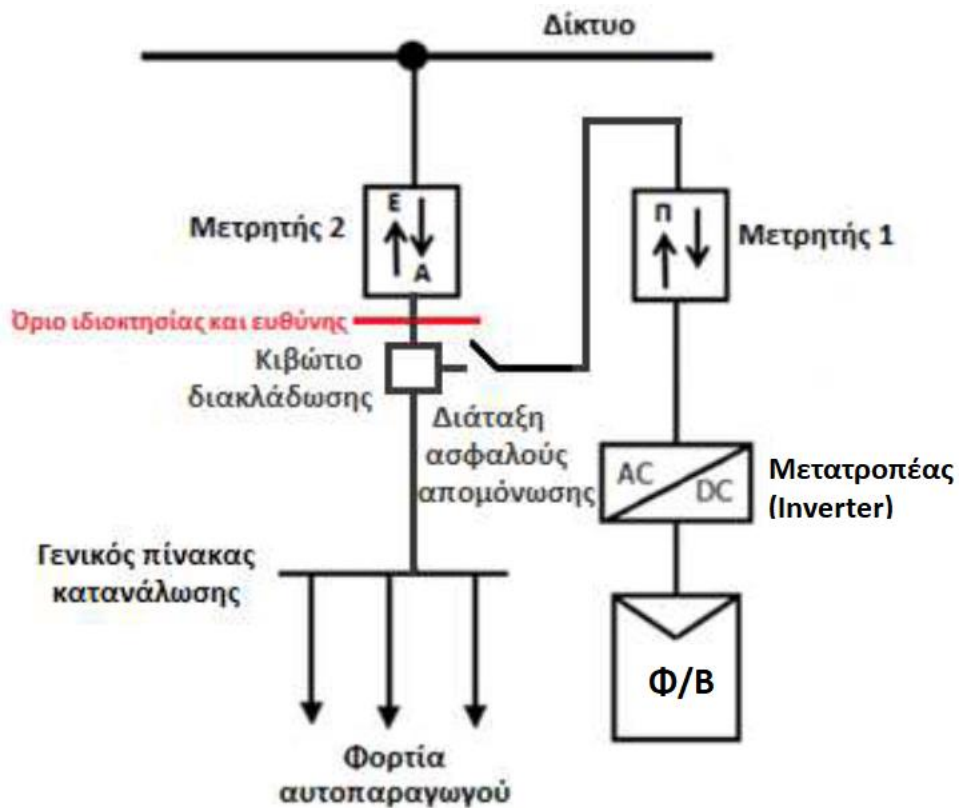
2.2.4 Ο μετρητής ενέργειας

Όπως αναφέρεται και στον παραπάνω τίτλο, ο σκοπός του μετρητή ενέργειας σε μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών είναι η μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Είναι μια συσκευή η οποία χρησιμοποιείται σε όλες τις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών στις οποίες οι ιδιοκτήτες προμηθεύουν με ρεύμα το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο ή λειτουργούν μονάδες με ενεργειακό συμψηφισμό (net metering).



Εικόνα 14: Τριφασικός μετρητής ενέργειας για net metering (Πηγή: Olympic Engineering¹⁶)

Οι μετρητές που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα είναι απαραίτητο να συμπεριλαμβάνονται στην λίστα του ΔΕΔΔΗΕ. Ανάλογα τον τύπο της εγκατάστασης, διακρίνονται σε μονοφασικά και τριφασικά μοντέλα, και θα πρέπει να είναι συμβατοί και με τους μετατροπείς (inverter) των φωτοβολταϊκών. Επίσης, πριν την εγκατάστασή του, ο κάθε μετρητής πιστοποιείται μέσω δοκιμών για την ορθή λειτουργία του, ώστε τόσο ο ιδιοκτήτης, όσο και ο διαχειριστής του τοπικού δικτύου ηλεκτρισμού (π.χ. ΔΕΔΔΗΕ) να είναι σίγουροι για τις ενδείξεις των μετρήσεων που παρέχει. Στην Εικόνα 15 παρακάτω απεικονίζεται ένα τυπικό σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας μετρητών σε μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με net metering (ενεργειακό συμψηφισμό).



Εικόνα 15: Παράδειγμα συνδεσμολογίας μετρητών ενέργειας σε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών αυτοπαραγωγού ενεργειακού συμψηφισμού (Πηγή: ΔΕΔΔΗΕ¹⁷)

2.2.5 Οι συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές (ή μπαταρίες) δεν συμπεριλαμβάνονται σε όλες τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Αγοράζονται και τοποθετούνται μόνον σε περιπτώσεις όπου υπάρχει η ανάγκη για αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και χρήσης της σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα, όπως για παράδειγμα σε συστήματα τα οποία χρειάζονται τροφοδότηση με ρεύμα τις νυχτερινές ώρες και βρίσκονται σε απομακρυσμένες ή δύσβατες περιοχές, στις οποίες δεν υπάρχει διαθέσιμο ηλεκτρικό δίκτυο. Τέτοια παραδείγματα είναι ορισμένες απομονωμένες οικίες σε ορεινές περιοχές, καθώς και μετεωρολογικοί σταθμοί.

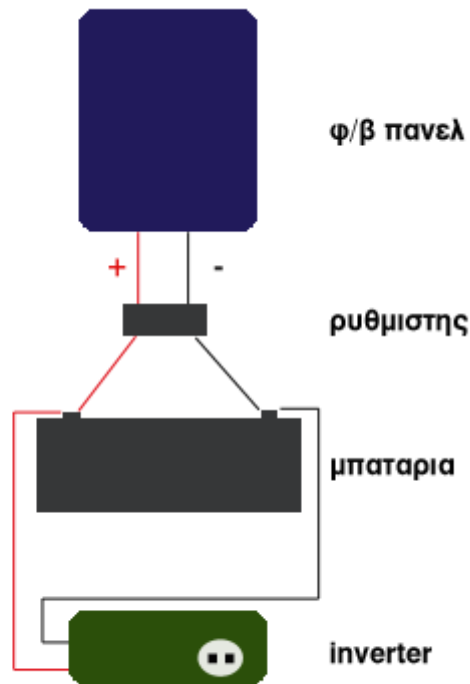
Με τα φωτοβολταϊκά μπορούμε να τροφοδοτούμε απ' ευθείας τις ηλεκτρικές συσκευές μιας εγκατάστασης ή μιας οικίας όσο υπάρχει ηλιοφάνεια, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις στις οποίες φορτίζουμε με το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει το φωτοβολταϊκό μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, και οι ηλεκτρικές συσκευές λειτουργούν με ρεύμα που παίρνουν

από τη μπαταρία. Το φωτοβολταϊκό φροντίζει να αναπληρώνει κάθε μέρα την κατανάλωση σε Watt που χρειάστηκε να τροφοδοτήσει ο συσσωρευτής (μπαταρία) στις συσκευές.



Εικόνα 16: Συστοιχία συσσωρευτών για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (Πηγή: www.4green.gr ⁴³)

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν συσσωρευτές σε μια μονάδα φωτοβολταϊκών πάνελ, είναι απαραίτητη και η εγκατάσταση ενός ρυθμιστή φόρτισης, ο οποίος ελέγχει την διαδικασία φόρτισης του συσσωρευτή. Στην Εικόνα 17 παρακάτω απεικονίζεται η συνδεσμολογία ενός απλού φωτοβολταϊκού συστήματος. Ο ρυθμιστής φόρτισης φροντίζει για την σωστή φόρτιση της μπαταρίας. Ο inverter μετατρέπει τα 12V της μπαταρίας, σε 220V για να μπορούμε να συνδέσουμε πάνω του συσκευές που απαιτούν τάση 220V.



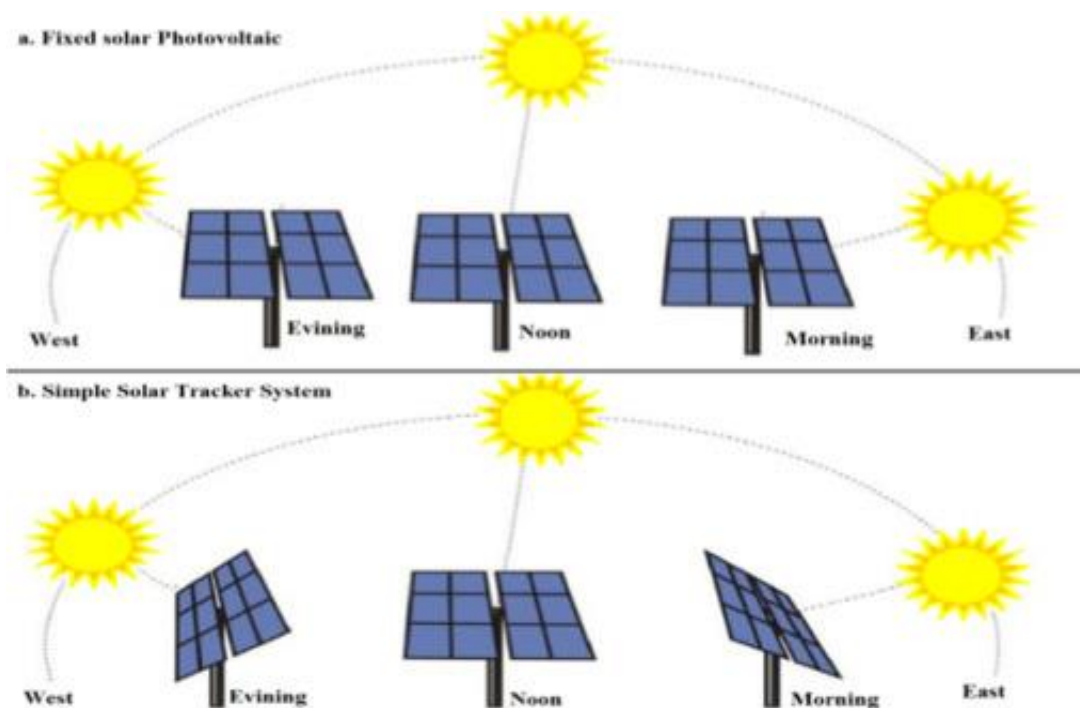
Εικόνα 17: Η συνδεσμολογία ενός απλού φωτοβολταϊκού συστήματος με συσσωρευτή, ρυθμιστή φόρτισης και inverter

2.2.6 Συστήματα παρακολούθησης του ηλίου (PV trackers)

Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στηρίζονται σε ειδικές βάσεις, οι οποίες μπορεί να είναι είτε σταθερές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18 παρακάτω, είτε βάσεις οι οποίες μπορούν να ακολουθούν την πορεία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας μέσω κινούμενων μηχανισμών, γνωστών και ως συστήματα παρακολούθησης του ήλιου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος απεικονίζεται στην Εικόνα 19.



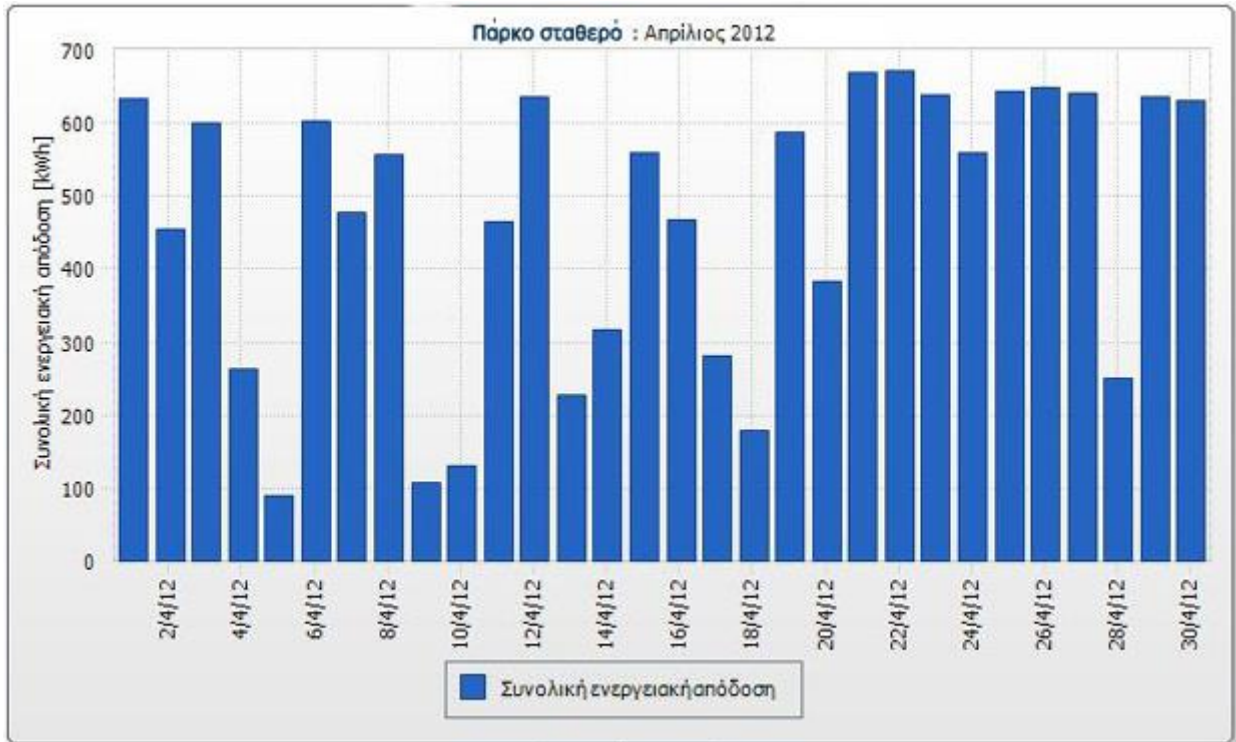
Εικόνα 18: Σταθερή βάση στήριξης φωτοβολταϊκού πάνελ (Πηγή: ALUMILSOLAR ¹⁸)



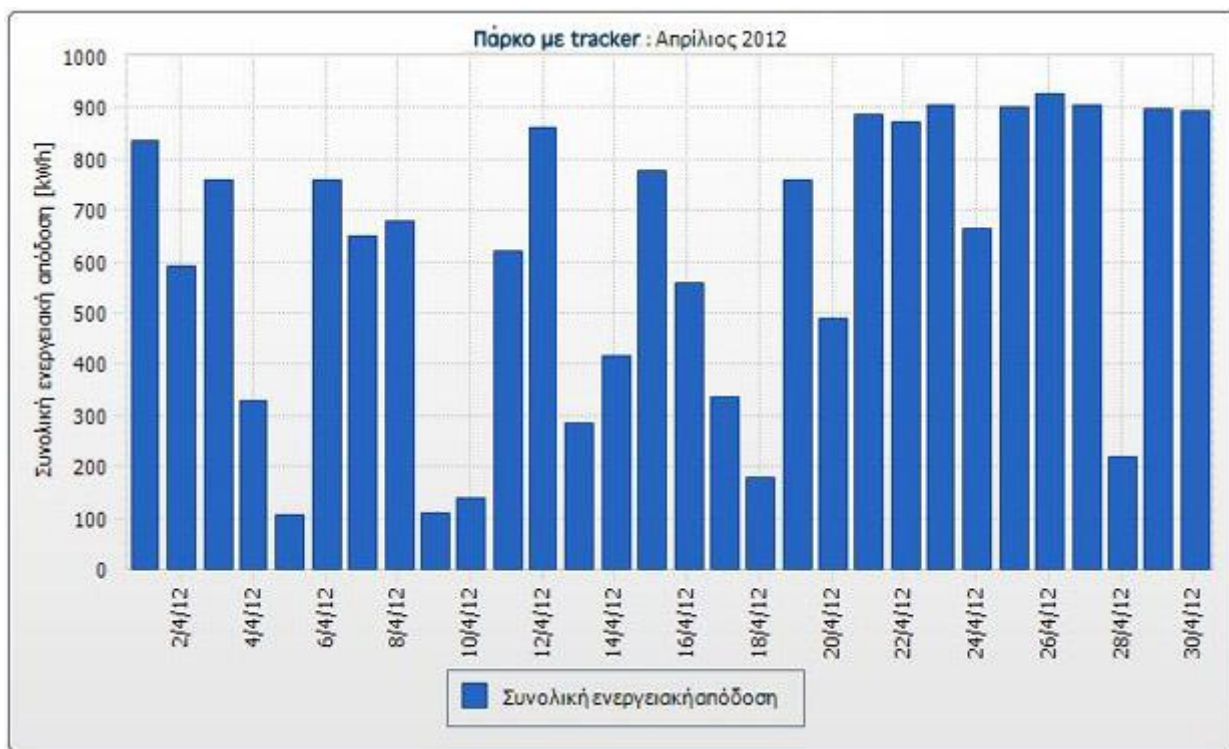
Εικόνα 19: Κινούμενο σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου (Πηγή: Al-Rousan et al ¹⁹)

Οι σταθερές βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι κατασκευασμένες κατά κύριο λόγο από αλουμίνιο, και χρησιμοποιούνται σε ταράτσες, κεραμοσκεπές, βιομηχανικές στέγες-αποθήκες, στάβλους, αγροτικά κτίρια, ακόμα και για έδαφος με τη μέθοδο της πασαλόμπτυξης ή της μπετόμπτυξης. Το πλεονέκτημα των κινούμενων συστημάτων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου είναι ότι τα φωτοβολταϊκά πάρκα στα οποία χρησιμοποιούνται τέτοιου

είδους συστήματα έχουν αυξημένα ποσοστά παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Για παράδειγμα, σε συγκριτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε δυο φωτοβολταϊκά πάρκα στα Φάρσαλα της Θεσσαλίας, τα οποία απέχουν 5-6 χιλιόμετρα το ένα από το άλλο και βρίσκονται στο ίδιο υψόμετρο, τον μήνα Απρίλιο του 2012 το πάρκο με τις σταθερές βάσεις παρήγαγε συνολικά 14.010 kWh, ενώ αυτό με τους trackers παρήγαγε συνολικά 18.410 kWh, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 20 και 21 παρακάτω.



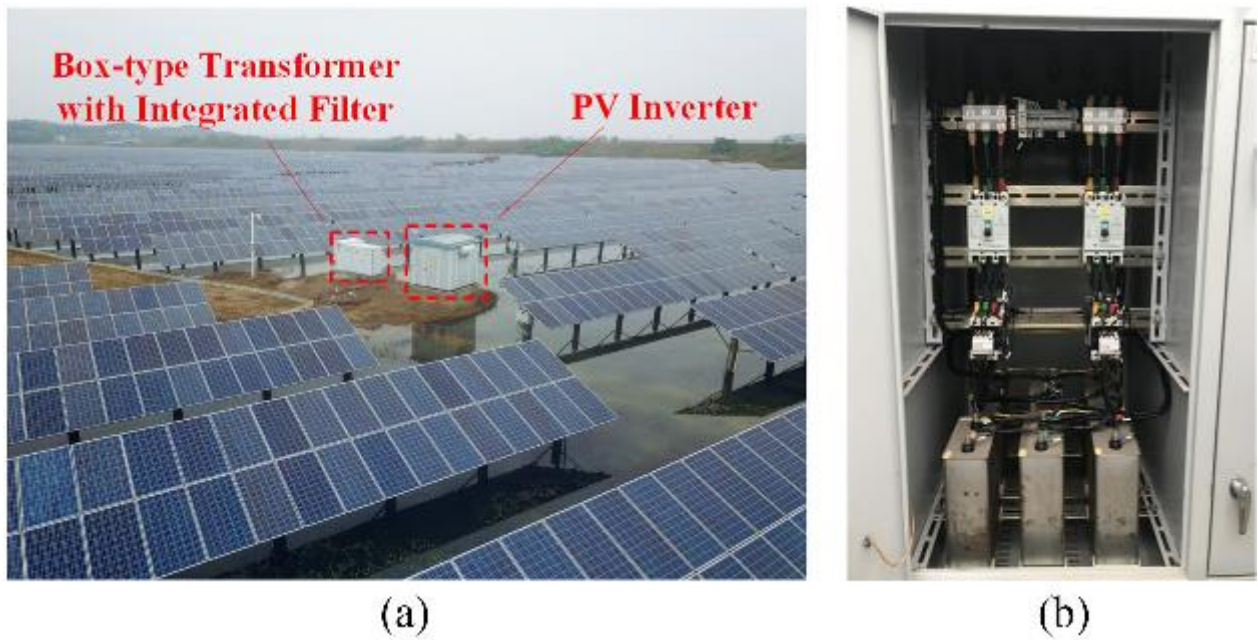
Εικόνα 20: Συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για το φωτοβολταϊκό πάρκο με σταθερή βάση στήριξης (Πηγή: SunnyPortal ²⁰)



Εικόνα 21: Συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για το φωτοβολταϊκό πάρκο με trackers (Πηγή: SunnyPortal²⁰)

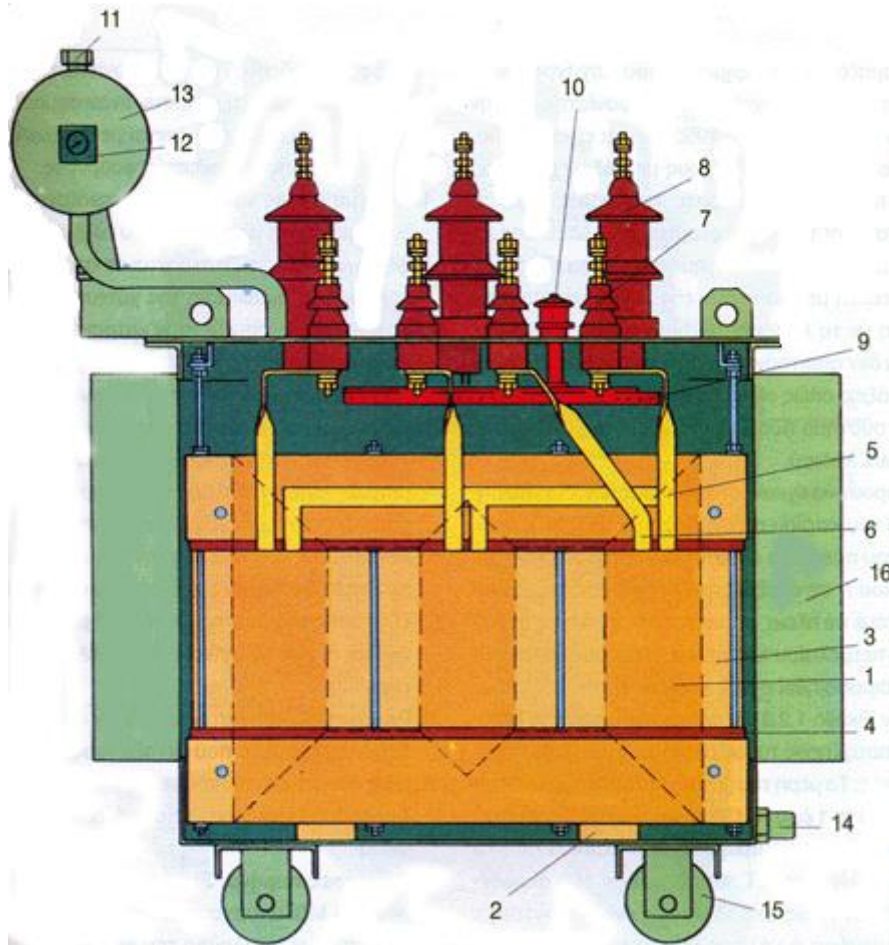
2.2.7 Ο υποσταθμός μέσης τάσης

Οι υπαίθριοι υποσταθμοί Μέσης Τάσης σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που οι απαιτήσεις ισχύος ενός καταναλωτή ξεπερνούν τα 100kVA. Η ίδια ανάγκη παρατηρείται και για τα φωτοβολταϊκά συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 400kW. Ο υποσταθμός τοποθετείται στην ύπαιθρο σε βάση από οπλισμένο σκυρόδεμα με κατάλληλη υποδομή για είσοδο-έξοδο καλωδίων. Ο οικίσκος, είναι ειδικά σχεδιασμένος προκειμένου να στεγάσει ηλεκτρολογικό εξοπλισμό με μετασχηματιστή, πίνακα μέσης τάσης και έναν πίνακα χαμηλής τάσης. Ο οικίσκος φέρει χαλύβδινο σκελετό, ο οποίος περιμετρικά είναι επενδυμένος με τοιχοποιία από πάνελ πολυουρεθάνης και οροφή επίσης με πάνελ πολυουρεθάνης, για μέγιστη θερμομόνωση.



Εικόνα 22: Μια τυπική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με τον υποσταθμό της μονάδας στο κέντρο (Πηγή: Liu et al 2019²¹)

Ο ρόλος του μετασχηματιστή είναι ο υποβιβασμός ή η ανύψωση της τάσης. Οι μετασχηματιστές είναι διατάξεις πηνίων, όπου με την ιδιότητα του φαινομένου της αυτεπαγωγής πετυχαίνουμε μετασχηματισμό της τάσης και του ρεύματος από μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης. Εάν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή, η μεταβολή του ρεύματος έχει σαν συνέπεια την μεταβολή της μαγνητικής ροής στο δευτερεύον τύλιγμα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Η τάση και το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή εξαρτάται από το πάχος του σύρματος των πηνίων, τον αριθμό στροφών των πηνίων και το μέγεθος του σιδηροπυρήνα. Στην Εικόνα 23 βλέπουμε την τομή ενός τριφασικού μετασχηματιστή ελαίου με αριθμημένα τα διάφορα μέρη του, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 στη συνέχεια.



Εικόνα 23: Διάταξη τριφασικού μετασχηματιστή ελαίου (Πηγή: www.ti-soft.com²²)

Πίνακας 2: Τα μέρη του τριφασικού μετασχηματιστή ελαίου (Πηγή: www.ti-soft.com²²)

Αριθμός	Περιγραφή
1	Πυρήνας (Core): Κατασκευάζεται από ειδικά σιδερένια ελάσματα που μεταξύ τους είναι μονωμένα για να ελαττώσουμε τις μαγνητικές απώλειες. Ο πυρήνας έχει τρία σκέλη, ένα για κάθε φάση.
2	Στηρίγματα πυρήνα (Core support): Μεταξύ του πυθμένα του δοχείου και του πυρήνα μεσολαβεί κάποια απόσταση για να μπορεί να κυκλοφορεί το λάδι.
3	Τυλίγματα (Winding): Σε κάθε σκέλος του πυρήνα υπάρχουν δύο τυλίγματα (πηνία). Στο εσωτερικό βρίσκεται το τυλίγμα της χαμηλής τάσης (Χ.Τ.) και

	<p>εξωτερικά το τύλιγμα της μέσης τάσης. Το τύλιγμα X.T. είναι κατασκευασμένο από χάλκινες ή αλουμιένιες μπάρες, ενώ το τύλιγμα της M.T. είναι από χάλκινο σύρμα.</p>
4	<p>Στηρίγματα τυλιγμάτων (winding support): Η στερέωση των τυλιγμάτων X.T. και M.T. τόσο μεταξύ τους όσο και πάνω στον πυρήνα είναι πολύ κρίσιμη και γίνεται με μονωτικά στηρίγματα. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, αναπτύσσονται στα τυλίγματα μεγάλες δυνάμεις Laplace που μπορούν να καταστρέψουν το Μ/Σ.</p>
5	<p>Άκρα των τυλιγμάτων (α): Τα τρία άκρα των τυλιγμάτων χαμηλής τάσης γεφυρώνονται με χάλκινη μπάρα και δημιουργείται ο ουδέτερος κόμβος. Ο ουδέτερος συνδέεται στο κάτω μέρος του μονωτήρα διέλευσης και προκύπτει έτσι ο ακροδέκτης του ουδετέρου (n).</p>
6	<p>Άκρα των τυλιγμάτων (β): Τα τρία άλλα άκρα των τυλιγμάτων χαμηλής τάσης συνδέονται στους μονωτήρες διέλευσης και προκύπτουν οι ακροδέκτες 2U, 2V, 2W.</p>
7	<p>Μονωτήρες διέλευσης X.T. (LV bushing) από πορσελάνη: Ονομάζονται μονωτήρες διέλευσης, διότι από μέσα τους διέρχεται το ρεύμα X.T.. Στον ένα τους ακροδέκτη, που είναι μέσα στο λάδι, συνδέονται οι απολήξεις των τυλιγμάτων X.T.. Στον άλλο τους ακροδέκτη, που είναι στον αέρα, συνδέονται τα καλώδια X.T. που αναχωρούν από το Μ/Σ.</p>
8	<p>Μονωτήρες διέλευσης M.T. (MV bushing) από πορσελάνη: Στον ένα τους ακροδέκτη, που είναι μέσα στο λάδι, συνδέονται οι απολήξεις των τυλιγμάτων M.T.. Στον άλλο τους ακροδέκτη, που είναι στον αέρα, συνδέονται τα καλώδια M.T. που έρχονται από την κυψέλη προστασίας του Μ/Σ.</p>
9	<p>Ρυθμιστής τάσης (off-circuit tap changer): Τα τυλίγματα μέσης τάσης έχουν ενδιάμεσα λήψεις που καταλήγουν σε ένα περιστροφικό διακόπτη. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα διαφορετικών λήψεων, δηλαδή να χρησιμοποιούμε περισσότερες ή λιγότερες σπείρες στο πρωτεύον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα</p>

	την αλλαγή του λόγου των σπειρών του Μ/Σ και, συνεπώς, τη ρύθμιση της τάσης του δευτερεύοντος. Η ρύθμιση αυτή γίνεται όταν ο Μ/Σ είναι εκτός κυκλώματος (off-circuit).
10	Χειριστήριο ρυθμιστή τάσης
11	Δοχείο διαστολής (expansion vessel): Η θερμοκρασία του λαδιού σε κανονική λειτουργία του Μ/Σ φτάνει τους 100°C, με αποτέλεσμα τη διαστολή του . Το δοχείο διαστολής συνδέεται με σωλήνα με το δοχείο του Μ/Σ και όσο η θερμοκρασία του λαδιού ανεβαίνει, ανεβαίνει η στάθμη του λαδιού, διώχνοντας τον αέρα που βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοχείου. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η θερμοκρασία του λαδιού κατεβαίνει. Σήμερα κατασκευάζονται στεγανοί Μ/Σ λαδιού, με ειδικά σχεδιασμένα πτερύγια ψύξης που παίρνουν τις διαστολές του λαδιού και, συνεπώς, δεν χρειάζονται δοχείο διαστολής. Οι στεγανοί (sealed tank) Μ/Σ δεν χρειάζονται συντήρηση, διότι το λάδι δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα και έτσι δεν αλλοιώνεται
12	Δείκτης στάθμης λαδιού (oil-level indicator): Μας δείχνει τη στάθμη του λαδιού στο δοχείο διαστολής.
13	Τάπα αερισμού και πλήρωσης με λάδι (Ventilation and filling cap): Από εδώ εξέρχεται ο αέρας που υπάρχει στο δοχείο διαστολής όταν θερμαίνεται το λάδι του Μ/Σ.
14	Βάνα αποχέτευσης του λαδιού (Drain plug): Από εδώ γίνεται η εκκένωση του λαδιού.
15	Τροχοί κύλισης (Roller): Η μετακίνηση του Μ/Σ μέχρι την τελική του θέση γίνεται με κύλιση στους τέσσερις τροχούς του.
16	Ψυκτήρες (cooling ribs): Μοιάζουν με τις φέτες των θερμαντικών σωμάτων ακτινοβολίας και χρησιμεύουν για τη φυσική ψύξη του λαδιού.

Για μονάδες φωτοβολταϊκών ακόμα μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος, οι υποσταθμοί καταλαμβάνουν ακόμα μεγαλύτερη έκταση και έχουν περισσότερο πολύπλοκο εξοπλισμό, όπως για παράδειγμα στην εικόνα 24 παρακάτω.



Εικόνα 24: Φωτοβολταϊκό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 1MWp με τον υποσταθμό μέσης τάσης στο βάθος (Πηγή: Malvoni et al 2020 ²³)

2.3 Διάρκεια ζωής φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων

Η κερδοφορία ή η οικονομική ζημία μιας επένδυσης σε μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά εξαρτάται σημαντικά από την διάρκεια ζωής και την αξιόπιστη λειτουργικότητά της σε βάθος χρόνου. Όπως συμβαίνει και με κάθε άλλη ενεργειακή εγκατάσταση, η αξιοπιστία της φθίνει με την πάροδο των ετών, καθώς τα εξαρτήματα που την αποτελούν υπόκειται σε φθορές και αλλοιώσεις, είτε ως αποτέλεσμα της μακροχρόνιας χρήσης τους, είτε ως απόρροια βλαβών ή δυσλειτουργιών. Στις περισσότερες μελέτες η διάρκεια ζωής και ο ρυθμός μείωσης της λειτουργικότητας των φωτοβολταϊκών μονάδων είναι βασισμένες σε γενικευμένες μέσες τιμές στατιστικών δεδομένων. Σε γενικές γραμμές, εκτιμάται ότι μια τυπική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα έχει μια λειτουργική διάρκεια ζωής η οποία θα κυμαίνεται από 25 έως 30 χρόνια, χρονικό διάστημα στο οποίο οι κατασκευαστές εγγυώνται ότι η πτώση της ικανότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν θα ξεπεράσει το 20% [11]. Υπάρχουν,

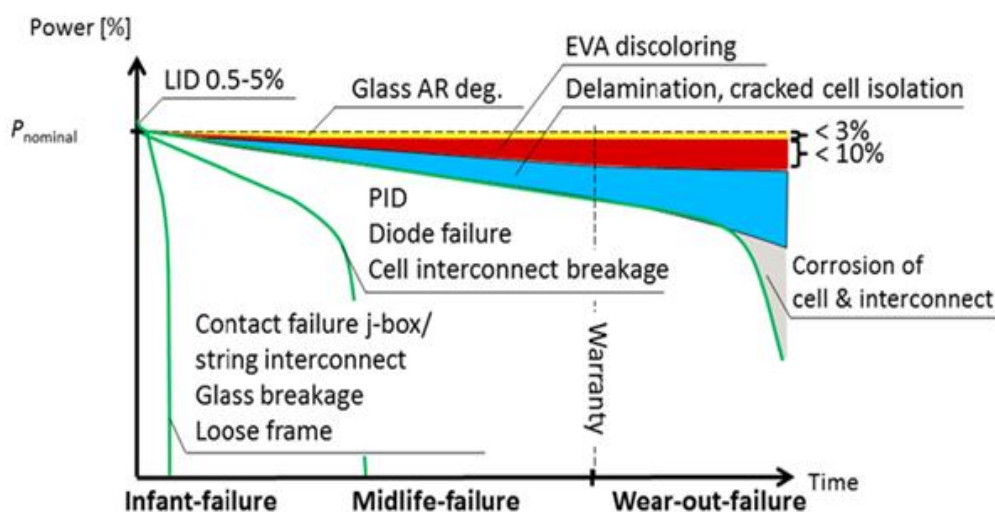
ωστόσο, περιπτώσεις στις οποίες η εκδήλωση βλαβών στα επιμέρους εξαρτήματα της εγκατάστασης ενδέχεται να μειώσει σημαντικά την διάρκεια ζωής της, με αποτέλεσμα την απώλεια κερδοφορίας της εν λόγω επένδυσης λόγω παύσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα, ή και για πάντα, όπως για παράδειγμα σε μια ενδεχόμενη εκδήλωση πυρκαγιάς από βραχυκύκλωμα. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί μια εκτενής ανάλυση των κυριότερων βλαβών που παρουσιάζονται σε μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, καθώς και των αιτιών στις οποίες αυτές οφείλονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΛΑΒΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Οι βλάβες που λαμβάνουν χώρα στα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην λειτουργική αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής των ίδιων των εγκαταστάσεων, όσο και στην ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται, καθώς σε ενδεχόμενη διακοπή λειτουργίας τους η τοπική κοινότητα στερείται μια εκ των πηγών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από τις οποίες τροφοδοτείται για τις καθημερινές της ανάγκες.

Η αύξηση της συχνότητας εμφάνισης βλαβών στα πάνελ εξηγείται εν μέρει από το γεγονός ότι τα εγκατεστημένα πάνελ εισέρχονται πλέον στο δεύτερο μισό της 1ης δεκαετίας της διάρκειας ζωής τους, και έχουν ήδη καταπονηθεί από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως υγρασία, χιόνι, υψηλές θερμοκρασίες, χαλάζι κλπ, αλλά και από ζητήματα ποιότητας κατασκευής που εμφανίζονται σε αυτό το στάδιο της ηλικίας τους. Το παρακάτω διάγραμμα μας δείχνει την πτώση της απόδοσης που οφείλεται:

- Στη γήρανση των πάνελ (κίτρινη – κόκκινη – γαλάζια γραμμή)
- Σε βλάβες των πάνελ κατά το ενδιάμεσο στάδιο της διάρκειας ζωής τους
- Σε βλάβες των πάνελ στο αρχικό στάδιο της διάρκειας ζωής τους



Εικόνα 25: Πτώση απόδοσης φωτοβολταϊκών ανάλογα με το στάδιο ζωής τους; (Πηγή: IEA 2014 ²⁷)

3.1 Βλάβες στα πάνελς (πλαίσια)

Οι βλάβες που παρουσιάζονται στα πάνελς των φωτοβολταϊκών και επηρεάζουν την λειτουργικότητά τους οφείλονται κατά κύριο λόγο σε χωμάτινες επικαθίσεις, ανεπιθύμητη σκίαση, αποχρωματισμό της επιφάνειας απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας (EVA), θραύση του γυάλινου πλαισίου του πάνελ, και στο φαινόμενο της δυνητικής επαγόμενης υποβάθμισης. Η συχνότητα με την οποία παρουσιάζονται οι εν λόγω βλάβες δίνεται στον Πίνακα 3 παρακάτω.

Πίνακας 3. Οι συχνότερες βλάβες που παρουσιάζονται στα πάνελς των φωτοβολταϊκών (Πηγή: www.pv-tech.org)

Είδος Βλάβης	Ποσοστό (%) επί του συνόλου
Χωμάτινες επικαθίσεις (soiling)	23.4%
Ανεπιθύμητη σκίαση (shading)	16.8%
Αποχρωματισμός οξικών αιθυλενίου βινυλίου (EVA)	11.6%
Σπάσιμο γυάλινου πλαισίου	6.5%
Δυνητική Επαγόμενη Υποβάθμιση (PID)	5%

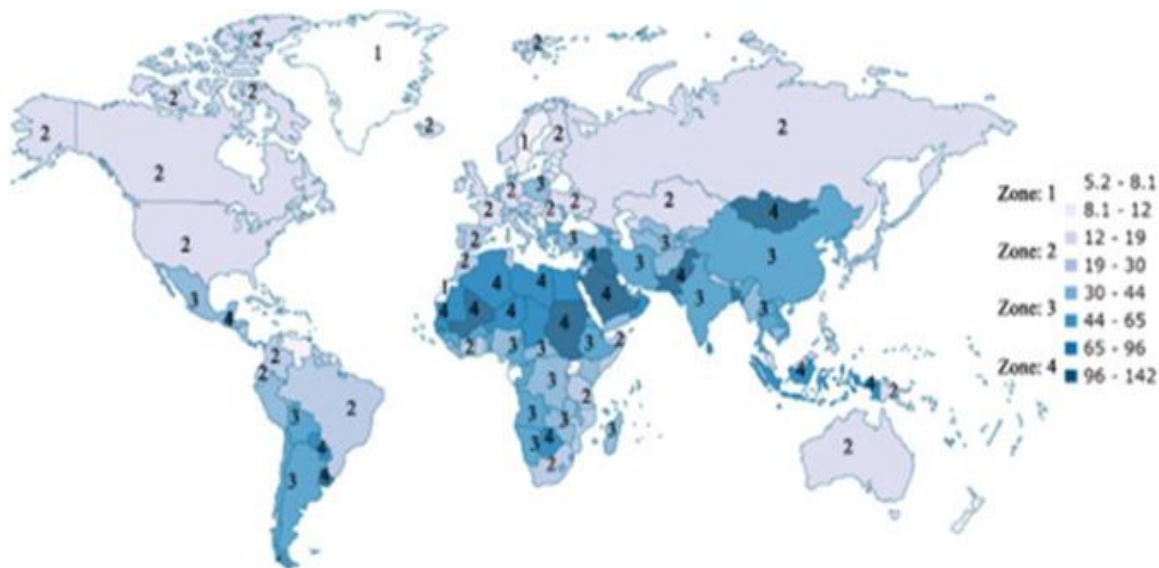
Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3, το συνηθέστερο πρόβλημα που παρουσιάζεται και επηρεάζει τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι οι χωμάτινες επικαθίσεις, με δεύτερο συχνότερο το φαινόμενο της ανεπιθύμητης σκίασης. Έπειτα ακολουθεί ο αποχρωματισμός της επιφάνειας απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας του ήλιου, το σπάσιμο του γυάλινου πλαισίου, και η δυνητική επαγόμενη υποβάθμιση.

3.1.1 Οι χωμάτινες επικαθίσεις

Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ εξαρτάται σε σημαντικότατο βαθμό από την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Ωστόσο, το περιβάλλον και οι κλιματολογικές συνθήκες της γύρω περιοχής επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών. Η κάλυψη της επιφάνειας ενός φωτοβολταϊκού από χόμα/άμμο/σωματίδια χωρίζεται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη έχει να κάνει με την ατμοσφαιρική ρύπανση, δηλαδή τα σωματίδια που εκπέμπονται

στην ατμόσφαιρα και εμποδίζουν τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας να φτάσει στην επιφάνεια του πάνελ, και χαρακτηρίζεται ως «ήπια». Η δεύτερη κατηγορία αφορά στην επικάλυψη στερεών σωματιδίων (χώμα, άμμος) στην επιφάνεια του πλαισίου, καλύπτοντας μέρος της, με αποτέλεσμα η απόδοση του φωτοβολταϊκού να πέφτει σημαντικά, και χαρακτηρίζεται ως «σημαντική».

Το φαινόμενο της επικάλυψης σκόνης / άμμου έχει παρατηρηθεί ότι είναι πιο έντονο σε χώρες της Αφρικής και της Μέσης Ανατολής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 26 παρακάτω. Υπάρχουν, ωστόσο, και περιοχές της Νότιας Ευρώπης και της Λατινικής Αμερικής, στις οποίες επίσης είναι έντονο το συγκεκριμένο φαινόμενο, και επομένως επηρεάζει την αποδοτικότητα της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πάνελ. Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι ακόμα και σε περιοχές με έντονες βροχοπτώσεις, όπως στο δάσος του Αμαζονίου, υπάρχει το ενδεχόμενο συσσώρευσης ακαθαρσιών στις επιφάνειες των πάνελς, εάν τα φωτοβολταϊκών δεν εγκατασταθούν με τη σωστή γωνία κλίσης, η οποία θα επιτρέπει την ροή του νερού προς το έδαφος [29].



Εικόνα 26. Ζώνες υψηλής συγκέντρωσης σκόνης ανά τον κόσμο (Πηγή: Maghami et al 2016 ²⁶)

Στην Εικόνα 27 παρακάτω φαίνεται μια τυπική περίπτωση επικαθίσεων σκόνης στις επιφάνειες φωτοβολταϊκών πάνελς, με εξαίρεση ένα το οποίο έχει καθαριστεί. Είναι προφανές ότι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα πλαίσια δεν απορροφάται επαρκώς.

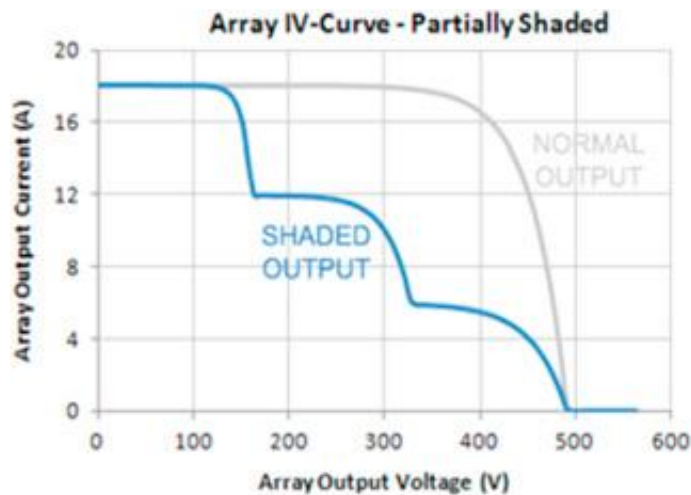


Εικόνα 27. Επικαθίσεις σκόνης σε φωτοβολταϊκά πάνελς (Πηγή: Schill et al 2015 ³²)

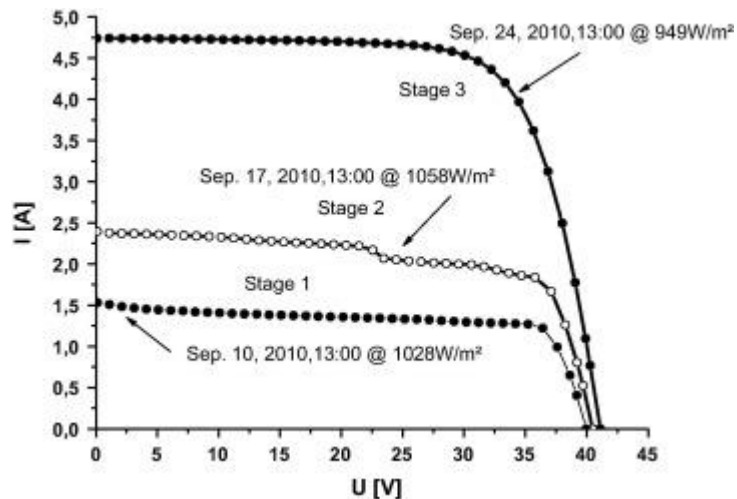
Εκτός από το φαινόμενο των χωμάτινων επικαθίσεων, είναι σημαντικό να αναφέρουμε και τις αρνητικές επιπτώσεις που έχει στην απόδοση των φωτοβολταϊκών η σκίαση που καλύπτει μέρος των επιφανειών των πάνελς. Μπορεί να οφείλεται είτε σε αύξηση της βλάστησης της γύρω περιοχής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28 παρακάτω, είτε στην κακή χωροθέτηση της εγκατάστασης σε περιοχή η οποία περιβάλλεται από κτίρια. Σε κάθε περίπτωση, ως αποτέλεσμα παρατηρείται μια αξιοσημείωτη πτώση της παραγόμενης έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία έχει ως συνεπακόλουθη την πτώση της συνολικής απόδοσης της μονάδας. Στην Εικόνα 29 παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα αυτής της πτώσης στην ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών λόγω σκίασης.



Εικόνα 28. Χωμάτινες επικαθίσεις και ανεπιθύμητη σκίαση λόγω βλάστησης σε φωτοβολταϊκό (Πηγή: Clover I., www.pv-magazine.com 2017 ²⁴)



Εικόνα 29. Πτώση της απόδοσης λόγω σκίασης σε πάνελ φωτοβολταϊκών (Πηγή: Maghami et al 2016 ²⁶)



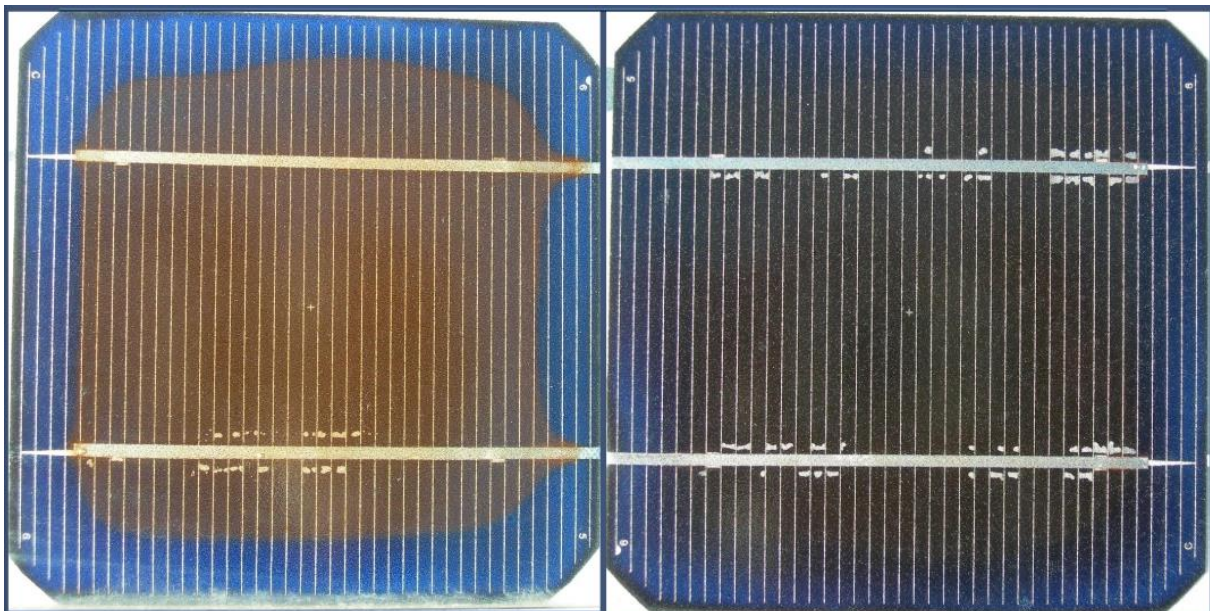
Εικόνα 30. Πτώση της απόδοσης λόγω επικαθίσεων σκόνης σε πάνελ φωτοβολταϊκών (Πηγή: Schill et al 2015 ³²)

3.1.2 Ο αποχρωματισμός οξικών αιθυλενίου βινυλίου (EVA)

Τα φύλλα EVA (Οξικό Άλας Αιθυλενίου Βινυλίου) χρησιμοποιούνται για να ενωθούν τα ηλιακά κύτταρα ενός φωτοβολταϊκού με βοήθεια της διαδικασίας αντικόλλησης με την γυάλινη επιφάνεια. Αυτή η κατασκευαστική μέθοδος επιτρέπει τον "εγκλεισμό" του ηλιακού πάνελ, συμβάλλει στην συνοχή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, και έχει σημαντική επίδραση στη διάρκεια λειτουργίας τους. Ο βαθμός μεθυσίωσης των φύλλων EVA μετά τη διαδικασία

αντικόλλησης είναι ένας σημαντικός δείκτης της ποιότητας του ηλιακού πάνελ. Συνήθως ο βαθμός μεθυσίωσης στα φύλλα EVA κυμαίνεται σε τιμές τουλάχιστον 85%.

Υπάρχουν, ωστόσο, περιπτώσεις στις οποίες φύλλα EVA χαμηλού βαθμού μεθυσίωσης μακροπρόθεσμα να οδηγήσουν σε αλλοιωμένα χρώματα, ή και σε αποσύνθεση, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών. Στην περίπτωση αποχρωματισμού των φύλλων EVA, όπως φαίνεται στην Εικόνα 31 παρακάτω, έχουμε απώλεια ρεύματος της τάξης του 0,5% ετησίως. Επίσης, το συγκεκριμένο φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα και την υποβάθμιση της πρόσφυσης ανάμεσα στα φύλλα EVA και στο γυαλί του πάνελ. Για παράδειγμα, μετρήσεις σε φωτοβολταϊκά πάνελ που λειτουργούν για 27 έτη έδειξαν απώλεια πρόσφυσης της τάξης του 10%, ενώ έχει επίσης αναφερθεί ότι φωτοβολταϊκά που φτάνουν τα 30 έτη λειτουργίας αγγίζουν το 80% της αρχικής τους παραγωγικής ικανότητας [33]. Όσο καλύτερης ποιότητας είναι ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, τόσο περισσότερες πιθανότητες έχει να ξεπεράσει το λειτουργικό όριο των 25 ετών, με προοπτική ακόμα και να φτάσει τα 40 χρόνια λειτουργίας, αλλά με μειωμένο βαθμό απόδοσης.



Εικόνα 31. Αποχρωματισμός EVA σε πάνελ φωτοβολταϊκών (Πηγή: Karlanı 2012³⁴)

3.1.3 Θραύση πλαισίου

Η θραύση της γυάλινης επιφάνειας στην έμπροσθεν πλευρά των πάνελς είναι άλλη μια συνηθισμένη βλάβη η οποία επηρεάζει αρνητικά την απόδοση λειτουργίας των φωτοβολταϊκών. Η συγκεκριμένη επιφάνεια αποτελεί την πρώτη γραμμή «άμυνας» του φωτοβολταϊκού πλαισίου στα καιρικά φαινόμενα, όπως η βροχή, η σκόνη, το χιόνι και το χαλάζι. Γενικά, τα γυάλινα πλαίσια κατασκευάζονται με προδιαγραφές υψηλής αντοχής, ώστε η να ανταποκρίνονται ικανοποιητικά σε υψηλές καταπονήσεις. Υπάρχουν περιπτώσεις, ωστόσο, στις οποίες αυτά θραύονται, με αποτέλεσμα την μη αποτελεσματική συγκράτηση της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας εντός του πάνελ, καθώς αυτή διαφεύγει πίσω στην ατμόσφαιρα μετά την πρόσπτωση στην πίσω επιφάνεια των φωτοβολταϊκών, αλλά και την εισχώρηση ξένων σωμάτων στην εσωτερική επιφάνεια του πλαισίου, κάτι που συνεπάγεται και την μειωμένη ικανότητα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 32. Θραύση γυάλινου πλαισίου φωτοβολταϊκού λόγω χαλαζόπτωσης (Πηγή: www.pneurope.eu ³⁵)

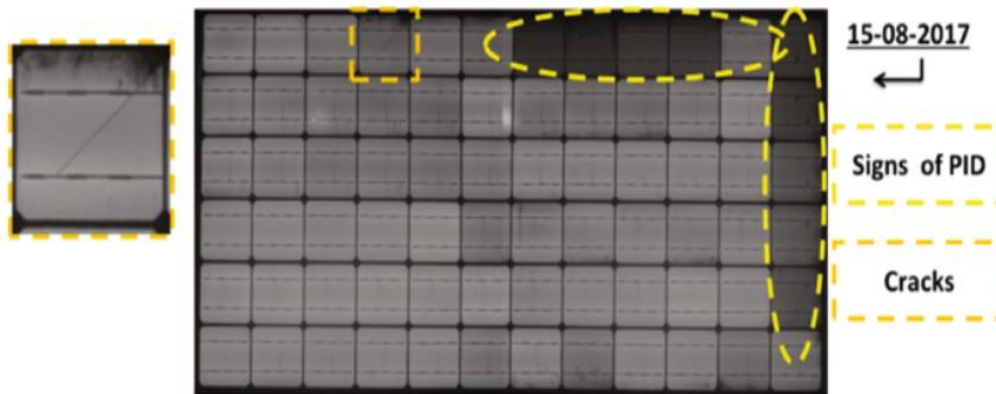
Μια ακόμη αιτία θραύσης του γυάλινου πλαισίου στην μπροστινή πλευρά των φωτοβολταϊκών είναι η υπερβολική σύσφιξη στις βίδες που χρησιμοποιούνται για την στερέωση του μεταλλικού σκελετού. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 31 παρακάτω.



Εικόνα 33. Θραύση γυάλινου πλαισίου φωτοβολταϊκού λόγω υπερβολικής σύσφιξης βίδας (Πηγή: ΙΕΑ 2014 ²⁷)

3.1.4 Η Δυνητική Επαγόμενη Υποβάθμιση (PID)

Το φαινόμενο της Δυνητικής Επαγόμενης Υποβάθμισης (Potential Induced Degradation - PID), το οποίο κάνει την εμφάνιση του σε ορισμένες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, προκαλεί μια ανεπιθύμητη πτώση της απόδοσής τους. Η πτώση αυτή σε καμία περίπτωση δε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, αφού σε ένα χρονικό ορίζοντα λίγων ετών μπορεί να αγγίξει ακόμη και το 30% της αρχικής απόδοσης της μονάδας. Πρόκειται για μια διαδικασία η οποία μπορεί να λάβει χώρα μερικά μόλις χρόνια μετά την αρχική εγκατάσταση μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, και προκαλεί μια επιταχυνόμενη υποβάθμιση της απόδοσής της. Σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, το φαινόμενο της δυνητικής επαγόμενης υποβάθμισης εντοπίζεται κυρίως στα περιφερειακά κελιά, τα οποία γειτνιάζουν με το πλαίσιο αλουμινίου του πάνελ, ενώ είναι λιγότερο έντονο στα κελιά του κεντρικού τμήματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 34 παρακάτω.



Εικόνα 34. Δυνητική επαγόμενη υποβάθμιση σε φωτοβολταϊκό (Πηγή: Bouaichi et al 2019 ²⁵)

Οι σημαντικότεροι παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν στην εμφάνιση του συγκεκριμένου φαινομένου είναι:

- *Τα υλικά κατασκευής των φωτοβολταϊκών πλαισίων.* Έχει παρατηρηθεί ότι η χημική σύνθεση της αντι-ανακλαστικής επίστρωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην δημιουργία και εξέλιξη της δυνητικής επαγόμενης υποβάθμισης. Το ίδιο ισχύει και όσον αφορά την ποιότητα του γυάλινου πλαισίου, καθώς και της επιφάνειας απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού.
- *Ο τρόπος σύνδεσης της εγκατάστασης.* Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πάνελς ανά σειρά, ο τύπος του μετατροπέα τάσης, καθώς και η γείωση της μονάδας παίζουν σημαντικό ρόλο στο μέγεθος του εμφανιζόμενου μέγιστου αρνητικού δυναμικού (maximum negative potential).
- *Εξωτερικοί παράγοντες.* Οι δυο πιο σημαντικοί εξωτερικοί παράγοντες οι οποίοι συμβάλλουν στην εμφάνιση του συγκεκριμένου φαινομένου είναι η υψηλή θερμοκρασία και η υψηλή ατμοσφαιρική υγρασία.

3.2 Βλάβες του αντιστροφέα τάσης (inverter)

Οι βλάβες που παρουσιάζονται στους αντιστροφείς τάσης των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων οφείλονται κυρίως σε μονάδες οι οποίες εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, και υψηλές

εντάσεις ρεύματος. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και η δυνατότητα του ίδιου του αντιστροφέα τάσης να ελέγχει και να μετριάζει την αύξηση της θερμοκρασίας του μέσω του κατάλληλου εξοπλισμού [9]. Εξαρτήματα όπως οι πυκνωτές, οι ηλεκτρικοί διακόπτες και οι ηλεκτρονικές πλακέτες των αντιστροφέα τάσης έχει παρατηρηθεί πως ευθύνονται για την πλειονότητα των βλαβών που συμβαίνουν στις συγκεκριμένες συσκευές.

Επίσης, μια ενδεχόμενη βλάβη στον ανεμιστήρα ο οποίος χρησιμοποιείται για την ψύξη του αντιστροφέα τάσης μπορεί να οδηγήσει στην υπερθέρμανσή του, επηρεάζοντας κατ' αυτό τον τρόπο την συνολική διάρκεια ζωής του και την λειτουργική του αξιοπιστία. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι σύγχρονοι inverters χρησιμοποιούν ανεμιστήρες οι οποίοι λειτουργούν αξιόπιστα για χρονικές περιόδους οι οποίες υπερβαίνουν τα δέκα έτη, αλλά αυτό εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των inverters. Στον Πίνακα 4 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι κυριότερες βλάβες που συναντώνται στους αντιστροφείς τάσης των φωτοβολταϊκών.

Πίνακας 4. Οι συχνότερες βλάβες που παρουσιάζονται στους αντιστροφείς τάσης των φωτοβολταϊκών [10]

Είδος Βλάβης	Ποσοστό (%) επί του συνόλου
Βλάβη του ανεμιστήρα ψύξης / υπερθέρμανση	21.8%
Προβλήματα με τη γείωση του inverter	4.9%
Πρόβλημα με το λογισμικό του inverter	3.8%
Βραχυκύκλωμα / πυρκαγιά στο καλώδιο παροχής ή στον ηλεκτρικό διακόπτη	2.2%
Λανθασμένη εγκατάσταση	4.8%

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βλάβης στους μετατροπείς τάσης μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών αποτελεί η περίπτωση του φωτοβολταϊκού πάρκου του Ullum της επαρχίας San Juan στην Αργεντινή. Στην συγκεκριμένη μονάδα προκλήθηκε πυρκαγιά σε μια σειρά μετατροπέων τάσης, πιθανότατα λόγω λαθών από τους τεχνικούς κατά την εγκατάστασή τους, και χρειάστηκαν 90 λεπτά από τη στιγμή που κατέφθασαν οι πυροσβέστες μέχρι να τεθεί η πυρκαγιά υπό έλεγχο. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 35 παρακάτω, οι inverters της εγκατάστασης καταστράφηκαν ολοσχερώς



Εικόνα 35. Η πυρκαγιά στους inverters του φωτοβολταϊκού πάρκου στο Ullum της Αργεντινής (Πηγή: www.pv-magazine.com ³⁶)

Όσον αφορά τις ενέργειες που μπορούν να γίνουν από πλευράς κατασκευαστών για την αποφυγή εμφάνισης των προαναφερθέντων βλαβών, αυτές εστιάζονται κυρίως στη σωστή εκπαίδευση και κατάρτιση του τεχνικού προσωπικού, στις δοκιμές αξιόπιστης λειτουργικότητας των εξαρτημάτων, στην αναθεώρηση των σχεδιαστικών και λειτουργικών προδιαγραφών τους, καθώς και στην πιστοποίηση της ποιότητας του παραγόμενου εξοπλισμού από τους κατασκευαστές.

3.3 Βλάβες στις καλωδιώσεις

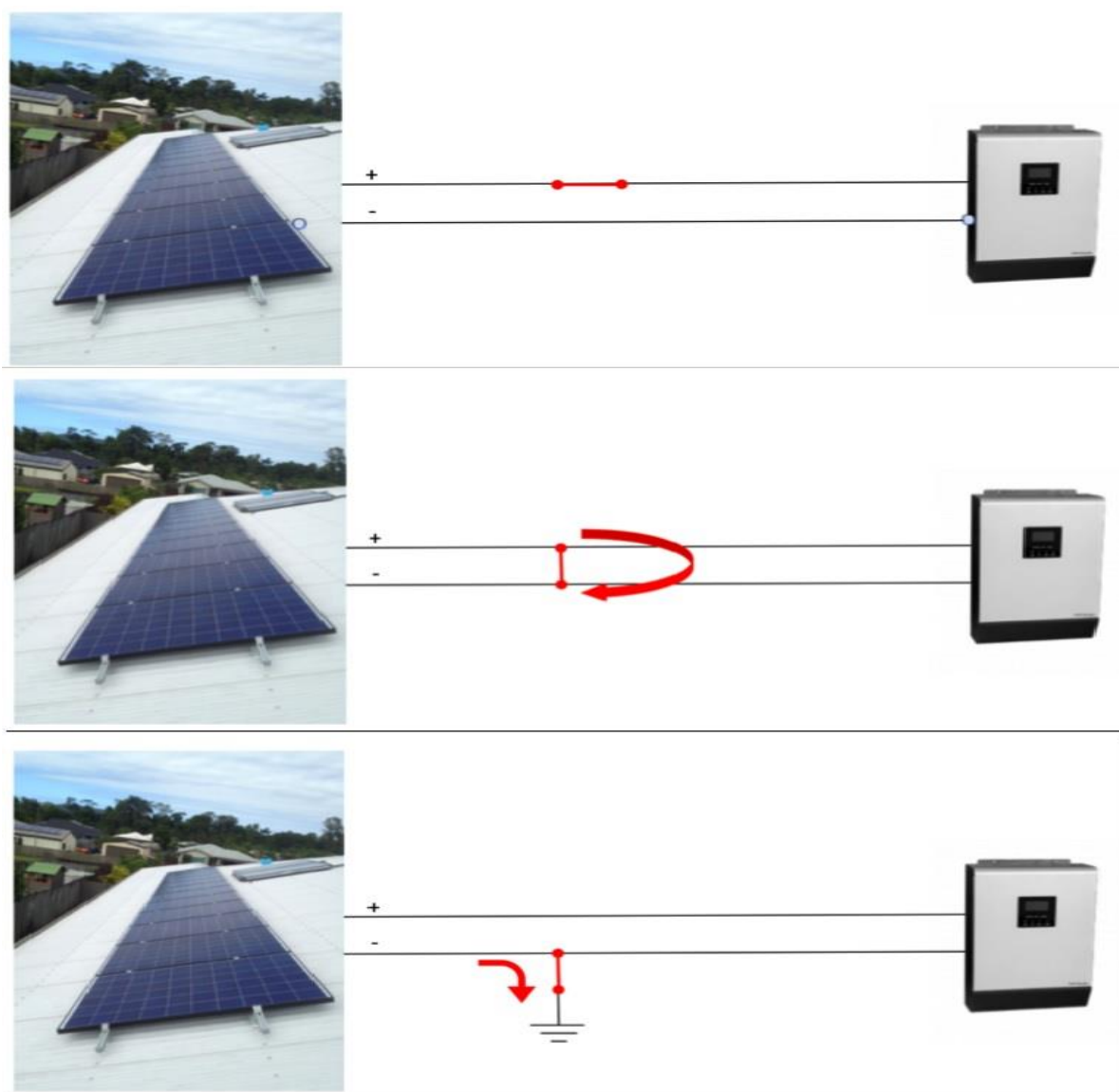
Τυχόν ελαττωματική συνδεσμολογία μεταξύ των καλωδίων ενός φωτοβολταϊκού και των διακοπών DC μπορεί να έχει ως επακόλουθο απώλειες ρεύματος, υπερθέρμανση ή ακόμα και εκδήλωση πυρκαγιάς στο σημείο σύνδεσης. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα σε ορισμένες περιπτώσεις οι μονώσεις των καλωδίων να αρχίσουν να παρουσιάζουν σημάδια φθοράς με τον χρόνο, ή ακόμη και να έχουν καταστραφεί από χτυπήματα, ή ακόμα και από τρωκτικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 36. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μόνωση των καλωδίων μπορεί να καταστραφεί και από τις απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (εναλλαγή μεταξύ υπερβολικά χαμηλών – υπερβολικά υψηλών θερμοκρασιών).



Εικόνα 36. Φθαρμένη μόνωση καλωδίωσης σε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών από τρωκτικά (Πηγή: www.ontario-solar-installers.ca ³⁸)

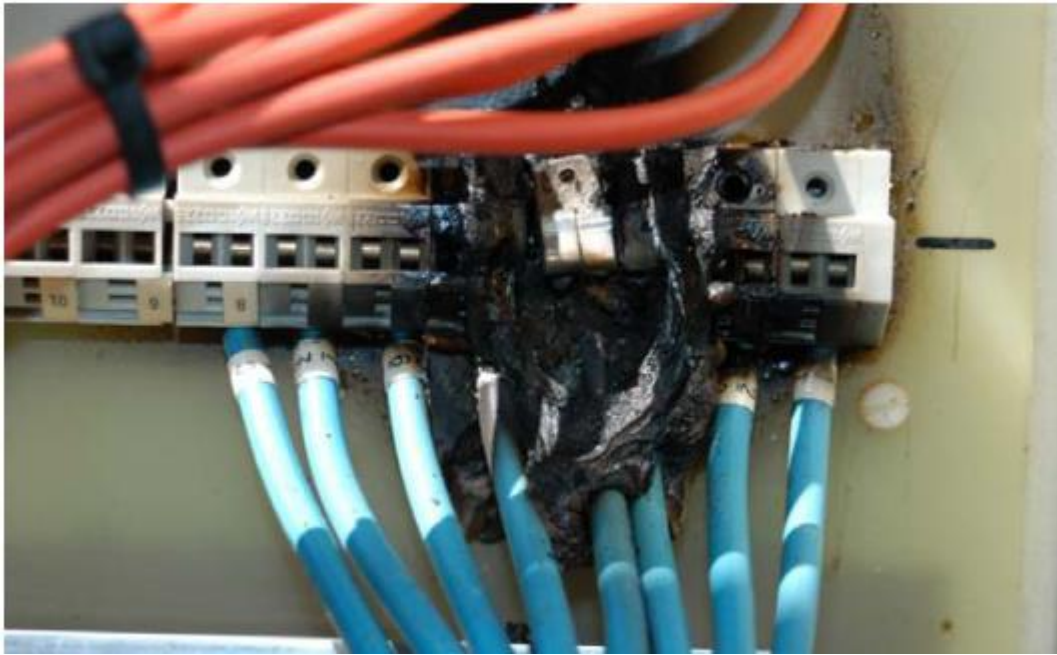
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βλάβης η οποία παρουσιάζεται στις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών και σε πολλές περιπτώσεις οφείλεται σε λανθασμένη συνδεσμολογία των καλωδιώσεων, ή ακόμα και σε φθαρμένες καλωδιώσεις (όπως, για παράδειγμα, καλώδια με κατεστραμμένη μόνωση σε κάποιο σημείο τους) είναι η δημιουργία βολταϊκού τόξου (DC arc). Αυτό το φαινόμενο μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις όπου το παραγόμενο συνεχές (DC) ρεύμα από τα φωτοβολταϊκά πάνελς βρίσκει δίοδο διαφυγής εκτός του κατευθυνόμενου δικτύου κυκλοφορίας των καλωδιώσεων της μονάδας, και δημιουργεί μια διεπαφή εκτός της καλωδίωσης.

Στην Εικόνα 37 παρακάτω δίνονται τρία χαρακτηριστικά παραδείγματα δημιουργίας αυτού του φαινομένου, όπου η διεπαφή απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Ειδικά στην τελευταία περίπτωση, δημιουργείται βολταϊκό τόξο λόγω προβλήματος στην γείωση της εγκατάστασης, με αποτέλεσμα το συνεχές ρεύμα μη έχοντας τη δυνατότητα να κατευθυνθεί στο έδαφος μέσω της γείωσης, να δημιουργεί το συγκεκριμένο φαινόμενο σε μια περιοχή στην οποία υπάρχει φθορά ή ελαττωματική συνδεσμολογία των καλωδιώσεων.



Εικόνα 37. Τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις δημιουργίας βολταϊκού τόξου σε καλωδιώσεις φωτοβολταϊκών (Πηγή: www.acsolarwarehouse.com³⁷)

Αξίζει να αναφερθεί επίσης πως σε αρκετές περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί βλάβες και στις συνδεσμολογίες των καλωδιώσεων, οι οποίες ενδεχομένως να οδηγήσουν σε πυρκαγιά, όπως φαίνεται στο παράδειγμα της Εικόνας 38 παρακάτω. Σε περίπτωση όπου μια σύνδεση ενός καλωδίου είναι υπερβολικά σφιχτή ή υπερβολικά χαλαρή, υπάρχει το ενδεχόμενο το διερχόμενο ρεύμα να προκαλέσει τοπική υπερθέρμανση η οποία μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε φωτιά. Είναι εξαιρετικά σημαντικό, λοιπόν, το τεχνικό προσωπικό το οποίο αναλαμβάνει εργασίες τοποθέτησης φωτοβολταϊκών να είναι κατάλληλα εκπαιδευμένο και καταρτισμένο, για την αποφυγή τέτοιων περιστατικών.



Εικόνα 38. Πυρκαγιά σε συνδεσμολογία καλωδιώσεων λόγω υπερβολικής σύσφιξης (Πηγή: Zhao et al 2011³⁹)

3.4 Βλάβες στον μετασχηματιστή

Οι μετασχηματιστές αποτελούν ακριβό και μεγάλης σπουδαιότητας εξοπλισμό ενός υποσταθμού μέσης τάσης, και πιθανή βλάβη τους έχει συνέπεια οικονομικές επιπτώσεις, τεχνικές επιπτώσεις και επικίνδυνες καταστάσεις για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Οι συνηθέστερες βλάβες που συμβαίνουν στους μετασχηματιστές μιας εγκατάστασης είναι οι παρακάτω [40]:

- *Διαρροή λαδιού*: η διαρροή λαδιού από έναν μετασχηματιστή μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις, τόσο στην ασφαλή λειτουργία του ίδιου του μετασχηματιστή (μείωση της μονωτικής του ικανότητας), όσο και στο περιβάλλον, καθώς το έλαιο που χρησιμοποιείται είναι εξαιρετικά επιβλαβές. Σε περίπτωση διαρροής, αυτή παρουσιάζεται σε σημεία συσφίξεως, όπου η ενδεικνυόμενη ενέργεια είναι να σφίξουμε τις βίδες ή να αντικαταστήσουμε τα παρεμβύσματα, εφόσον χρειαστεί. Αν η διαρροή παρουσιάζεται σε μεταλλικά σημεία του δοχείου, συνίσταται η επικοινωνία με τον κατασκευαστή, καθώς η διαδικασία αποκατάστασης της βλάβης απαιτεί μεγάλη προσοχή και ειδική εξειδίκευση. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν αναφερθεί και περιπτώσεις στις οποίες η εκδήλωση ενός σεισμού στην περιοχή όπου βρίσκεται

εγκατεστημένος ένας μετασχηματιστής είχε ως αποτέλεσμα την διαρροή λαδιού, λόγω μετατόπισης [41].



Εικόνα 39. Διαρροή λαδιού σε μετασχηματιστή (Πηγή: www.transformermaintenance.com ⁴²⁾

- *Αύξηση θερμοκρασίας λαδιού:* Οι απώλειες χαλκού και σιδήρου του μετασχηματιστή μετατρέπονται στο εσωτερικό του σε θερμότητα που έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού (αν ο μετασχηματιστής είναι ελαιόψυκτος). Για την αποφυγή της υπερθέρμανσης του λαδιού συνιστάται έλεγχος υπερφόρτωσης, έλεγχος και βελτίωση του εξαερισμού του χώρου, καθώς και έλεγχος του θερμομέτρου.

Μια από τις βασικές απαιτήσεις της σωστής προστασίας του μετασχηματιστή είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας του λαδιού ή χυτορητίνης, ώστε να μην ξεπεράσει τα όρια που έχει ορίσει ο κατασκευαστής του. Για τον συγκεκριμένο σκοπό χρησιμοποιούνται τα θερμομέτρα λαδιού που παρακολουθούν τη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος λαδιού του μετασχηματιστή. Αυτή θα πρέπει να είναι μικρότερη των 100°C. Το θερμομέτρο είναι εφοδιασμένο με δύο ανοικτές επαφές. Όταν η βελόνα ξεπεράσει το πρώτο όριο των 90°C, τότε κλείνει η πρώτη επαφή και κτυπά ο συναγερμός του υποσταθμού.

Ο συντηρητής θα πρέπει αμέσως να ελέγξει, αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στο σύστημα ψύξης του μετασχηματιστή ή, στην ανάγκη, να απορρίψει άμεσα κάποια από τα φορτία του. Αν η θερμοκρασία του λαδιού συνεχίζει να ανεβαίνει και η βελόνα του θερμομέτρου ξεπεράσει το δεύτερο όριο, π.χ. 100°C, αυτόματα δίνεται εντολή απόζευξης (trip) του διακόπτη ισχύος στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή [22]. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή αστοχίας του προστατευτικού εξοπλισμού, η υπερθέρμανση του λαδιού του μετασχηματιστή μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε έκρηξη. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι σε περίπτωση βλάβης σε έναν μετασχηματιστή μέσης τάσης σε μια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, ο αναγκαίος χρόνος για την αποκατάστασή της μπορεί να είναι ακόμη και ένας μήνας.

3.5 Βλάβες στους συσσωρευτές

Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται συσσωρευτές για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, υπάρχει το ενδεχόμενο να παρουσιαστούν ορισμένες δυσλειτουργίες, οι οποίες μπορεί να οφείλονται είτε στην πτώση της απόδοσής τους με την πάροδο του χρόνου, είτε στην υποβαθμισμένη ποιότητά τους από πλευράς κατασκευαστή, είτε σε λάθη κατά την εγκατάσταση και τον χειρισμό τους. Τα συχνότερα λάθη που παρατηρούνται όσον αφορά τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέως, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, τόσο για τα διασυνδεδεμένα συστήματα, όσο και για τα μη διασυνδεδεμένα είναι τα παρακάτω [43]:

- *Λανθασμένη επιλογή τύπου συσσωρευτή:* Οι μπαταρίες κατασκευάζονται με μία ποικιλία δομών και υλικών, ανάλογα με την εφαρμογή. Οι εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας απαιτούν συσσωρευτές με δυνατότητα εκφόρτισης μεγαλύτερη του 50% της χωρητικότητας αποθήκευσής τους, κατ' επανάληψη. Αυτό ονομάζεται «βαθύς κύκλος». Ένα πλήρως αυτόνομο οικιακό σύστημα θα χρειαστεί 50 έως 250 κύκλους φόρτισης εκφόρτισης ανά έτος σε 30-80% βάθος εκφόρτισης (ανάλογα με την περιστασιακή ή μόνιμη χρήση της κατοικίας). Σε εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά, θα πρέπει πάντα να χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας μπαταρίες, βαθιάς εκφόρτισης. Αντίθετα, οι μπαταρίες για εκκίνηση (αυτοκίνητα ή φορτηγά) έχουν σχεδιαστεί για γρήγορες, υψηλής ισχύος εκφορτίσεις, και μπορούν να κρατήσουν μόνο για λίγους βαθείς κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης, και γι' αυτό τον λόγο θα πρέπει να αποφεύγεται η χρησιμοποίησή τους σε μονάδες φωτοβολταϊκών.

▪ *Λανθασμένη επιλογή χωρητικότητας συσσωρευτή:* Για να σχεδιαστεί ένα αυτόνομο σύστημα Α.Π.Ε, χρειάζεται πρώτα να υπολογιστεί «το ημερήσιο ενεργειακό προφίλ». Αυτό είναι ο αριθμός των Βαττωρών (Whrs) που θα καταναλωθούν ανά ημέρα. Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνει προσδιορισμός απαιτούμενης αυτονομίας. Αυτή η μεταβλητή μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ μιας και πέντε ημερών, ανάλογα με τη μέση ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, την απόδοση της φόρτισης των πηγών ενέργειας και την εποχιακή διαθεσιμότητά τους, καθώς και την δυνατότητα του χρήστη να χρησιμοποιήσει μια εφεδρική γεννήτρια. Με την πάροδο του χρόνου τα περισσότερα οικιακά συστήματα μεγαλώνουν. Προστίθενται νέα φορτία, η φωτοβολταϊκή συστοιχία μεγαθύνεται, αλλά ένα συγκρότημα συσσωρευτών δεν μπορεί να επεκταθεί εύκολα. Οι μπαταρίες συνήθως εργάζονται ως σύνολο. Μετά από περίπου ένα χρόνο, δεν είναι συνετό να προστεθούν νέες μπαταρίες σε ένα εγκατεστημένο σύστημα. Αν προβλέπεται αύξηση στο σύστημα, το καλύτερο είναι να ξεκινήσουμε με μια αποθήκη ενέργειας μεγαλύτερη από ό τι συνήθως χρειάζεται. Παράλληλα όμως πρέπει να εξασφαλιστεί επαρκής ικανότητα φόρτισης, αλλιώς η συστοιχία θα υποφορτίζεται, γεγονός που θα οδηγήσει σε θείωση των πλακών και πρόωρη αποτυχία.

▪ *Ελλιπής συντήρηση:* Οι υγρές μπαταρίες απαιτούν την προσθήκη αποκλειστικά αποσταγμένου νερού κάθε ένα έως τέσσερις μήνες ανάλογα με τον τύπο, τη θερμοκρασία της μπαταρίας, καθώς και τις ρυθμίσεις του ελέγχου φόρτισης και τη χρήση του συστήματος. Πολλοί ξεχνούν να συντηρήσουν τις μπαταρίες τους με αποτέλεσμα το χαμηλό επίπεδο του ηλεκτρολύτη να προκαλεί υπερβολική έκλυση αερίων και κατά συνέπεια την παραμόρφωση των πλακών, βραχυκύκλωμα ή ακόμα και έκρηξη.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα έκρηξης συσσωρευτών σε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών αποτελεί η περίπτωση της μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας της εταιρείας Arizona Public Service στην Αριζόνα των ΗΠΑ στην οποία προκλήθηκε έκρηξη τον Απρίλιο του 2019. Η υπερθέρμανση των συσσωρευτών οδήγησε στην δημιουργία μιας μεγάλης ποσότητας εκλυόμενων εύφλεκτων αερίων στον χώρο εγκατάστασής τους, με αποτέλεσμα να προκληθεί έκρηξη η οποία είχε ως επακόλουθο την ολοκληρωτική καταστροφή της μονάδας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 40 παρακάτω. Ως αιτία για το συγκεκριμένο ατύχημα πιθανολογείται η δυσλειτουργία μιας κυψέλης στην συστοιχία των συσσωρευτών, η οποία αύξησε υπερβολικά την θερμοκρασία στο εσωτερικό τους, και η απουσία συστήματος εξαερισμού στον χώρο τοποθέτησής τους για την απομάκρυνση των αερίων.



Εικόνα 40. Η ζημιά που προκλήθηκε στο εσωτερικό της μονάδας συσσωρευτών της Arizona Public Service (Πηγή: Wagman 2020 ⁴⁴)

Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί ότι οι συσσωρευτές δεν πρέπει να υπερπληρώνονται. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να γεμίζονται πιο συχνά από ό, τι απαιτείται για να διατηρηθούν οι πλάκες υγρές. Οι συσσωρευτές θα πρέπει να γεμίζονται μόνο μέχρι το επίπεδο που συνιστάται από τον κατασκευαστή, διαφορετικά, κατά τη διάρκεια της τελικής φόρτισης, οι δημιουργούμενες φυσαλίδες θα προκαλέσουν πιθανή υπερχειλίση, οδηγώντας σε διάβρωση των πόλων και των καλωδίων της μπαταρίας. Αν και είναι μια πρόσθετη δαπάνη, ένα αυτοματοποιημένο σύστημα πλήρωσης μπαταριών (σε όποιες τεχνολογίες διατίθεται) απλοποιεί την πλήρωση της μπαταρίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Οι εργασίες της προληπτικής συντήρησης μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών μπορεί εκ πρώτης όψεως να φαίνονται απλές ή και ασήμαντες, εντούτοις όμως είναι απαραίτητες, καθώς βοηθούν στην πρόληψη ενδεχόμενης εκδήλωσης σοβαρών βλαβών μελλοντικά, οι οποίες μπορεί και να αποβούν μη επισκεύασιμες σε ορισμένες περιπτώσεις. Ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα συντήρησης του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών βελτιώνει σημαντικά τις πιθανότητες της ομαλής και χωρίς τεχνικά προβλήματα λειτουργίας της εν λόγω μονάδας. Σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει ακόμη και το ενδεχόμενο μια μονάδα φωτοβολταϊκών να υπερβεί την εκτιμώμενη ποσότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος [6]. Έτσι, συνεισφέρει θετικά στην αξιοπιστία της μακροχρόνιας απόδοσης της μονάδας, και επομένως στην εξασφάλιση σταθερών εσόδων από την εκμετάλλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Αξίζει τον κόπο να σημειωθεί, πάντως, ότι έως και σήμερα δεν υπάρχει κάποια προκαθορισμένη διαδικασία σειράς εργασιών για την συντήρηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενώ σε πολλές εγκαταστάσεις επικρατεί η τάση της παραμέλησης του ελέγχου των φωτοβολταϊκών μετά την αρχική τους εγκατάσταση. Υπάρχουν, ωστόσο, περιπτώσεις στις οποίες η ενδεχόμενη εμφάνιση μιας βλάβης ή δυσλειτουργίας της εγκατάστασης να μην γίνει αντιληπτή κατά το αρχικό της στάδιο, με αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης της μονάδας λόγω δυσλειτουργιών, ή ακόμη και την απώλεια της εγγύησης καλής λειτουργίας από πλευράς κατασκευαστή. Είναι, λοιπόν, σημαντικό να τονιστεί η ανάγκη της προληπτικής ή και της επεμβατικής συντήρησης σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, τόσο για την λειτουργική τους αξιοπιστία, όσο και για την εξασφάλιση των απαραίτητων εγγυήσεων των προμηθευτών τεχνικού εξοπλισμού, και κατ'έπекταση την βέλτιστη χρονική διάρκεια ζωής τους. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι συνηθέστερες εργασίες συντήρησης οι οποίες διενεργούνται στις εγκαταστάσεις των φωτοβολταϊκών.

4.1 Έλεγχος των πάνελς

Ο οπτικός έλεγχος μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών είναι η γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη μέθοδος εντοπισμού τυχόν βλαβών ή ελαττωμάτων [46]. Κατά τον έλεγχο της κατάστασης των Φ/Β πλαισίων ελέγχεται η παρουσία ακαθαρσιών όπως σκόνη, περιττώματα πουλιών ή άλλες επικαθίσεις. Καθώς η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β μονάδων επηρεάζεται από την διαθέσιμη επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων, ο σωστός έλεγχος της καλής κατάστασης της επιφάνειάς τους είναι εξαιρετικής σημασίας για την παραγωγικότητά τους. Είναι σημαντικό επίσης να τονιστεί ότι, όσον αφορά την επιθεώρηση και τον καθαρισμό των επιφανειών των Φ/Β πλαισίων, αυτή είναι μια εργασία η οποία μπορεί να εκτελεστεί και από τον ίδιο τον ιδιοκτήτη της εγκατάστασης, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το κόστος των εργασιών συντήρησης.

Ο οπτικός έλεγχος των πάνελς μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών ανά τακτά χρονικά διαστήματα συμβάλλει στην έγκαιρη διάγνωση βλαβών ή σημαδιών δυσλειτουργίας τα οποία μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ή και την σταδιακή επιδείνωση της λειτουργίας τους. Ένας τυπικός οπτικός έλεγχος μιας μονάδας φωτοβολταϊκών συνήθως περιλαμβάνει:

- Επιθεώρηση των μπροστινών επιφανειών των πάνελς για τυχόν επικαθίσεις, φθορές, αποχρωματισμό, θραύσεις.
- Επιθεώρηση των πίσω επιφανειών των πάνελς για τυχόν φθορές, σημάδια εκδήλωσης πυρκαγιάς (π.χ. λόγω βραχυκυκλώματος)
- Επιθεώρηση των αγωγών των πάνελς για οξείδωση ή παραμορφώσεις.
- Επιθεώρηση των στηριγμάτων των φωτοβολταϊκών για παραμορφώσεις, θραύσεις, εκδορές.
- Επιθεώρηση των καλωδιώσεων για φθορά, παραμόρφωση, γυμνά καλώδια, ψαθυρότητα
- Επιθεώρηση των συνδέσεων για οξείδωση, διάβρωση, χαλάρωση σύνδεσης, ψαθυρότητα

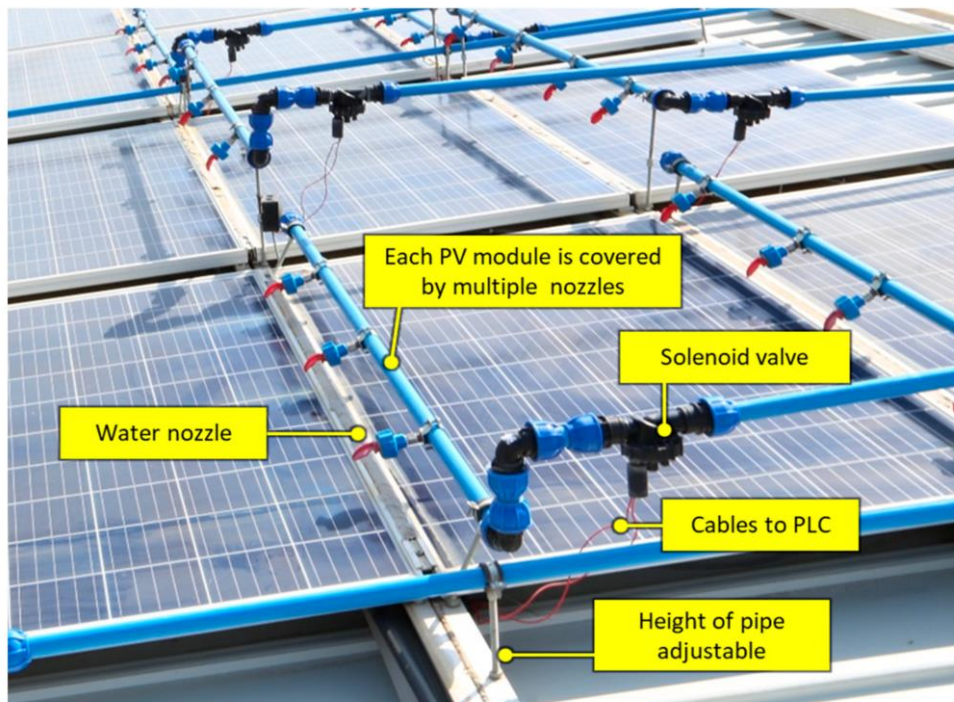


Εικόνα 41. Αποχρωματισμός του αγωγού πάνελ φωτοβολταϊκού λόγω υπερθέρμανσης (Πηγή: IEA 2014 ²⁷)

Στην Εικόνα 42 παρακάτω φαίνεται η εκτέλεση εργασιών καθαρισμού των επιφανειών των φωτοβολταϊκών πάνελς από τον ίδιο τον ιδιοκτήτη της εγκατάστασης. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, πως η συγκεκριμένη εργασία δεν είναι πάντοτε εύκολη, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι μονάδες είναι εγκατεστημένες σε δύσβατες και δυσπρόσιτες περιοχές, στις οποίες απαιτούνται ειδικές μέθοδοι μηχανικού καθαρισμού [29]. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 43 παρακάτω, όπου χρησιμοποιείται ένα αυτόματο σύστημα μηχανικού καθαρισμού των επιφανειών με νερό, καθώς και στην Εικόνα 44, όπου ο μηχανικός καθαρισμός γίνεται με τη βοήθεια ρομπότ.



Εικόνα 42: Καθαρισμός των επιφανειών των Φ/Β πλαισίων από τον ιδιοκτήτη τους



Εικόνα 43. Μηχανικός καθαρισμός των επιφανειών φωτοβολταϊκών πάνελς με χρήση συστήματος ψεκασμού νερού (Πηγή: Alghamdi et al 2019³⁰)



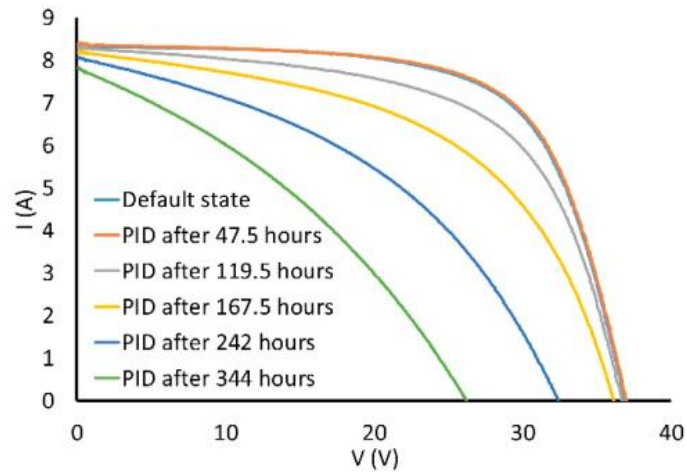
Εικόνα 44. Μηχανικός καθαρισμός των επιφανειών φωτοβολταϊκών πάνελς με χρήση ρομπότ (Πηγή: Grando et al 2017 ³¹)

4.2 Διάγνωση του φαινομένου PID

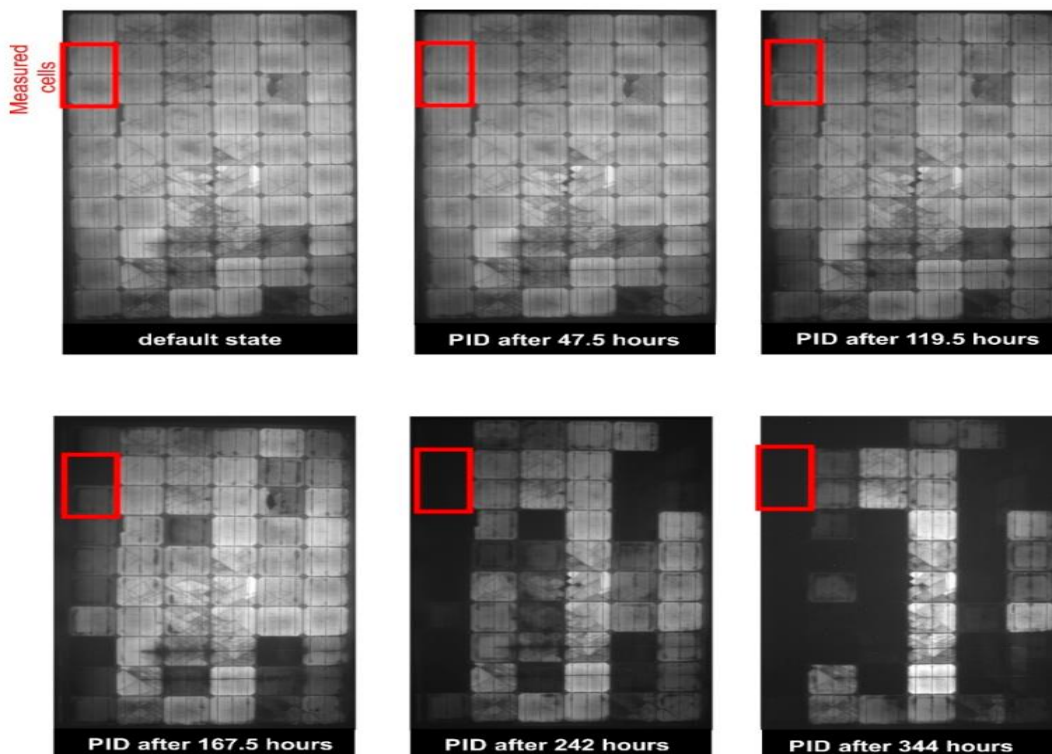
Το φαινόμενο της δυνητικής επαγόμενης υποβάθμισης (PID) μπορεί να διαγνωσθεί με την βοήθεια μετρήσεων της παραγόμενης τάσης (V) και έντασης (I) ενός φωτοβολταϊκού, και της αποτύπωσης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σε μια καμπύλη τάσης-έντασης (V-I καμπύλη). Στην Εικόνα 45 παρακάτω δίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός φωτοβολταϊκού στο οποίο με γαλάζιο χρώμα έχουμε την καμπύλη τάσης – έντασης σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, και με πορτοκαλί, γκρι, κίτρινο, μπλε και πράσινο χρώμα αποτυπώνονται οι μετρήσεις της τάσης και της έντασης κατά τις οποίες το φαινόμενο PID έχει εμφανιστεί μετά από 47,5 ώρες, 119,5 ώρες, 167,5 ώρες, 242 ώρες, και 344 ώρες αντίστοιχα. Όπως παρατηρούμε από τις παρακάτω καμπύλες, υπάρχει μια σαφής μείωση της παραγόμενης ισχύος στο συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια θα είναι λιγότερο αποδοτική στο συγκεκριμένο πάνελ.

Επίσης, το φαινόμενο PID μπορεί να διαγνωστεί και με τη βοήθεια απεικονίσεων του φωτοβολταϊκού πάνελ υπό εξέταση, με τη βοήθεια ηλεκτρονικά φθορίζοντων απεικονίσεων (electroluminescent images). Στην Εικόνα 46 παρακάτω παρουσιάζεται ένα αντίστοιχο παράδειγμα απεικονίσεων ενός φωτοβολταϊκού πάνελ (το ίδιο για το οποίο ελήφθησαν οι μετρήσεις τάσης-έντασης της Εικόνας 45), στο οποίο το συγκεκριμένο φαινόμενο έλαβε χώρα

για 47,5 ώρες, 119,5 ώρες, 167,5 ώρες, 242 ώρες και για 344 ώρες αντίστοιχα. Όπως παρατηρούμε στην απεικόνιση, οι περιοχές των κελιών του πλαισίου στις οποίες εμφανίζεται το φαινόμενο PID γίνονται όλο και περισσότερο σκουρόχρωμες με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 45. Καμπύλες τάσης-έντασης ενός φωτοβολταϊκού με δυναμική επαγόμενη υποβάθμιση (Πηγή: Finsterle et al 2021⁴⁵)



Εικόνα 46. Ηλεκτροφθορίζοντες απεικονίσεις φωτοβολταϊκού πλαισίου (Πηγή: Finsterle et al 2021⁴⁵)

4.3 Έλεγχος του αντιστροφέα τάσης (inverter)

Ο έλεγχος του αντιστροφέα τάσης (inverter) μιας φωτοβολταϊκής μονάδας συνίσταται να πραγματοποιείται από εξειδικευμένο τεχνικό μια φορά τον χρόνο. Στον έλεγχο συμπεριλαμβάνεται ο καθαρισμός του από τυχόν σκόνη ή άλλου είδους ακαθαρσίες, οι επικαθίσεις των οποίων στον χώρο του inverter μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια ισχύος και ανεπαρκή ψύξη. Ακόμη, πραγματοποιείται ταυτοποίηση των δεδομένων που παράγονται από τον αντιστροφέα όσον αφορά την παραγόμενη τάση με αυτά που μας δείχνει η οθόνη του. Επίσης κατά τον έλεγχο λειτουργίας του inverter της εγκατάστασης θα πρέπει να πραγματοποιείται η απενεργοποίηση και κατόπιν η εκ νέου ενεργοποίησή του, ώστε να διαπιστωθεί εάν πραγματοποιείται ομαλά η διαδικασία της επανεκκίνησης.

4.4 Επιθεώρηση των καλωδίων

Όπως αναφέρθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο, οι καλωδιώσεις των φωτοβολταϊκών μπορούν να υποστούν φθορές λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών, χτυπημάτων από αιχμηρά αντικείμενα κατά την εκτέλεση εργασιών, ή ακόμα και φθορά της εξωτερικής μόνωσης λόγω τρωκτικών. Για την αποφυγή των επιπτώσεων της φθοράς των καλωδίων είναι, λοιπόν, απαραίτητη η τακτική επιθεώρηση του δικτύου των καλωδιώσεων της εγκατάστασης, καθώς και των συνδεσμολογιών τους. Μπορούν, επίσης, να εφαρμοστούν και ορισμένες προληπτικές ενέργειες για την προστασία των καλωδίων. Για παράδειγμα, για την αποφυγή της έκθεσης σε δυσμενείς εξωτερικούς παράγοντες, μια καλή πρακτική είναι ο εγκλεισμός των καλωδίων μέσα σε σχάρες (κανάλια) οι οποίες τα προστατεύουν, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 47 παρακάτω.



Εικόνα 47. Προστασία καλωδιώσεων φωτοβολταϊκών σε κανάλια (Πηγή: www.solarbuildermag.com ²⁷)

Υπάρχει, ωστόσο, η περιοχή πίσω από την επιφάνεια των πάνελς, στην οποία δεν είναι δυνατή η χρήση των προστατευτικών καναλιών. Σε αυτή την περιοχή υπάρχει ο κίνδυνος φθοράς των καλωδίων λόγω τρωκτικών όπως ποντίκια, ή σκίουροι. Για την αποφυγή της κυκλοφορίας τρωκτικών στον χώρο όπου βρίσκονται εγκατεστημένες οι καλωδιώσεις των φωτοβολταϊκών πάνελς, μια λύση είναι η χρήση μεταλλικού πλέγματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 48 παρακάτω. Είναι σημαντικό, ωστόσο, η χρήση του πλέγματος να μην παρεμποδίζει την κυκλοφορία του αέρα στην κάτω πλευρά των φωτοβολταϊκών, για την αποφυγή φαινομένων υπερθέρμανσης σε περιόδους έντονης ηλιοφάνειας.



Εικόνα 48. Χρήση προστατευτικού μεταλλικού πλέγματος σε πάνελ φωτοβολταϊκών (Πηγή: www.ontario-solar-installers.ca ³⁸)

Είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί ότι εξαιρετικής σημασίας κατά τους ελέγχους προληπτικής συντήρησης είναι και η επιθεώρηση των συνδεσμολογιών των καλωδιώσεων, όπως επίσης και των καλωδίων της γείωσης. Κατά τον έλεγχο τυχόν χαλαρές συνδέσεις συσφίγγονται, για την αποφυγή δημιουργίας του φαινομένου του ηλεκτρικού τόξου, το ίδιο ισχύει φυσικά και στην περίπτωση που εντοπιστούν φθαρμένες μονώσεις στα καλώδια, οι οποίες χρειάζονται άμεση αντικατάσταση, επίσης και για την αποφυγή ενός ενδεχομένου βραχυκυκλώματος το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιά.

4.5 Έλεγχος του μετασχηματιστή

Οι εργασίες προληπτικής / επεμβατικής συντήρησης στον χώρο του μετασχηματιστή μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών περιλαμβάνουν μια πληθώρα ελέγχων, οι οποίοι περιλαμβάνουν τον έλεγχο της στάθμης του ελαίου του μετασχηματιστή, έλεγχο για τυχόν διαρροές συμπεριλαμβανομένης της ελαιολεκάνης του, έλεγχο της κατάστασης του κελύφους του μετασχηματιστή, δειγματοληψία ελαίου για έλεγχο διηλεκτρικής αντοχής, έλεγχο των ακροκιβωτίων των καλωδίων μέσης τάσης και έλεγχοι συσφίξεων, εξωτερικό καθαρισμό του μετασχηματιστή, έλεγχο των μονώσεων και των συστημάτων προστασίας με δοκιμή σωστής λειτουργίας, μέτρηση των μονώσεων των καλωδίων μέσης τάσης, μέτρηση των αντιστάσεων του μετασχηματιστή, καθώς επίσης και τον γενικό καθαρισμό του χώρου του μετασχηματιστή και του περιβάλλοντα χώρου.

4.6 Έλεγχος των συσσωρευτών

Στις περιπτώσεις των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων όπου χρησιμοποιούνται συσσωρευτές για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, η σωστή συντήρησή τους είναι εξαιρετικής σημασίας. Στις εργασίες προληπτικής συντήρησης των συσσωρευτών περιλαμβάνεται ο περιοδικός έλεγχος της στάθμης των υγρών της κάθε μπαταρίας. Σε περίπτωση χαμηλής στάθμης, συμπληρώνεται απιονισμένο νερό, μέχρι αυτή να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο. Επίσης, είναι σημαντικός ο έλεγχος των σημείων σύνδεσης των συσσωρευτών για σωστή σύσφιξη, καθώς και για τυχόν σημάδια διάβρωσης (βλ. Εικόνα 49 παρακάτω). Τέλος, είναι πολύ σημαντικός και ο έλεγχος για την ύπαρξη τυχόν αερίων στους συσσωρευτές, καθώς μια τέτοια περίπτωση αποτελεί ένδειξη προβλήματος του συστήματος φόρτισης.



Εικόνα 49. Συσσωρευτές μονάδας φωτοβολταϊκών με έντονα σημάδια διάβρωσης (Πηγή: <https://solarbuildermag.com>)

4.7 Η σημασία της θερμογράφησης

Η σημαντικότητα της τόσο εντυπωσιακής αύξησης των βλαβών στα πάνελ χρόνο με το χρόνο έγκειται στο ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι το τμήμα της εγκατάστασης όπου πραγματοποιείται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το θετικό στην υπόθεση είναι ότι βλάβες όπως για παράδειγμα μια καμένη δίοδος, το φαινόμενο PID, οι οποίες εμφανίζονται σε ένα πάνελ, μπορούν να διαγνωσθούν έγκαιρα και έτσι το πάνελ να επανέλθει στη φυσιολογική του κατάσταση. Αντίθετα, αν δεν διαγνωσθούν έγκαιρα τότε μπορεί από κάποιο σημείο και μετά να είναι μη αναστρέψιμες και να μεταδοθούν στα υπόλοιπα πάνελ. Είναι κρίσιμο λοιπόν ο κάθε ιδιοκτήτης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης να παρακολουθεί την κατάσταση της υγείας των πάνελ του με ένα τρόπο που να ανιχνεύει όλα τα προβλήματα, όσο γίνεται πιο νωρίς και πιο κοντά χρονικά στη στιγμή της εμφάνισής τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καλύτερο τρόπο με τη διαδικασία της θερμογράφησης. Με την συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου, ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης θα ωφεληθεί με διάφορους τρόπους [28]:

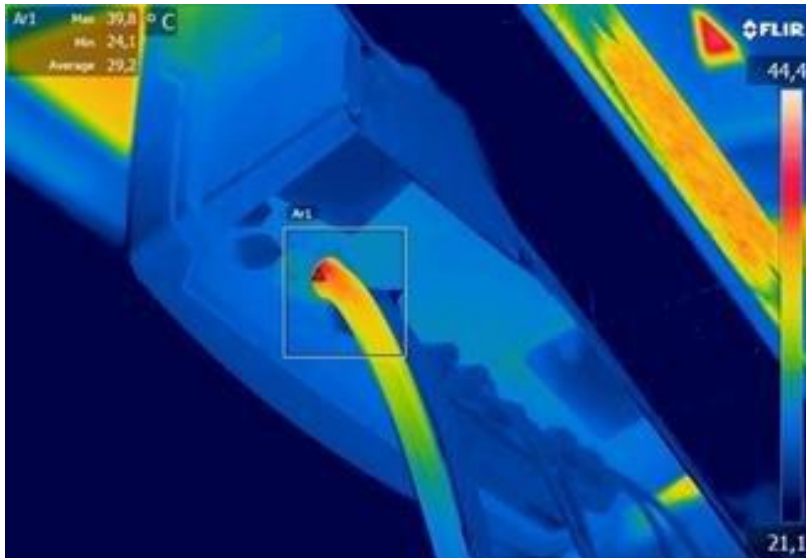
- Θα γνωρίζει ακριβώς τι περιθώρια βελτίωσης υπάρχουν στη φωτοβολταϊκή του εγκατάσταση
- Θα αντιμετωπίσει τα προβλήματα στο πολύ αρχικό στάδιο, καθώς η θερμογράφηση εντοπίζει και το παραμικρό πρόβλημα που εμφανίζεται, χωρίς επιπλέον απώλειες στην παραγωγή του

-
- Το κόστος αποκατάστασης θα μειωθεί σημαντικά, αφού η βλάβη δεν θα επεκταθεί σε άλλα πάνελ.
 - Τεκμηριώνει εύκολα τυχόν απαιτήσεις σε εγγυήσεις κατασκευαστών ή σε ασφαλιστικές εταιρίες.

Η θερμογραφία ή υπέρυθη απεικόνιση είναι μια μη καταστροφική μέθοδος ελέγχου, η οποία μπορεί να μας δώσει ενδείξεις δυσλειτουργίας μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, χωρίς να είναι απαραίτητη η άμεση επαφή με τα στοιχεία της εγκατάστασης, καθώς γίνεται με τη χρήση θερμοκάμερας εξ 'αποστάσεως (Εικόνα 50) σε μήκη κύματος μεταξύ 8μm και 14μm [46]. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με την μονάδα σε λειτουργία, και τα αποτελέσματα παρέχονται με τη μορφή απεικονίσεων στις οποίες οι θερμοκρασιακές διαφορές στις διάφορες επιφάνειες των φωτοβολταϊκών αποτυπώνονται με περιοχές διαφορετικού χρωματισμού. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 51 παρακάτω, στην οποία έχουμε υπερθέρμανση του καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος ενός μετατροπέα τάσης (inverter) λόγω λανθασμένης σύνδεσής του με τον inverter (χαλαρή σύσφιξη).



Εικόνα 50. Χρήση θερμοκάμερας για θερμογράφιση φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (Πηγή: www.murcal.com)



Εικόνα 51. Υπερθέρμανση καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος σε inverter λόγω κακής συνδεσμολογίας (χαλαρή σύσφιξη) (Πηγή: IEA 2014 ²⁷)

Οι ιδανικές συνθήκες για την πραγματοποίηση ελέγχου μιας φωτοβολταϊκής μονάδας με θερμογράφηση είναι ημέρα με λιακάδα, με ηλιακή ακτινοβολία κατ' ελάχιστον της τάξης των $700\text{W}/\text{m}^2$. Επίσης, η ατμοσφαιρική θερμοκρασία, όπως επίσης και ο άνεμος της περιοχής θα πρέπει να κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα για την αποφυγή λανθασμένων μετρήσεων. Σε κάθε περίπτωση, η θερμοκάμερα θα πρέπει να ρυθμιστεί από τον χρήστη στις αντίστοιχες συνθήκες θερμοκρασίας που επικρατούν την ώρα της λήψης στην περιοχή. Η γωνία λήψης της θερμοκάμερας θα πρέπει να προσεγγίζει κατά το δυνατόν περισσότερο τις 90° , και σίγουρα όχι λιγότερο από τις 60° ως προς την επίπεδη γυάλινη επιφάνεια του πάνελ. Επίσης, ο χειριστής της θερμοκάμερας θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τυχόν αντανάκλασεις της ηλιακής ακτινοβολίας ή και σκιάσεις επάνω στα πάνελς, ώστε να έχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η τελευταία τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα της θερμογράφησης είναι η χρήση drones με ενσωματωμένη θερμοκάμερα, ευρύτερα γνωστών με την ονομασία «thermal drones», με τα οποία πραγματοποιείται η εναέρια θερμογράφηση των φωτοβολταϊκών. Προϋπόθεση για την χρήση τέτοιων συστημάτων είναι η χρήση πιστοποιημένων θερμογράφων και χειριστών drones αδειοδοτημένων από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ), καθώς και η χρήση εξειδικευμένων λογισμικών σχεδιασμού πτήσεως και ανάλυσης δεδομένων.



Εικόνα 52. Εναέρια θερμογράφηση φωτοβολταϊκών με χρήση drones (Πηγή: Zefri et al 2018 ⁴⁷)

Η χρήση της εναέριας θερμογράφησης των φωτοβολταϊκών έχει ορισμένα σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με την κλασική χρήση θερμοκάμερας, όπως τα παρακάτω:

- *Ταχεία λήψη απεικονίσεων:* Σε ένα μεγάλο φωτοβολταϊκό έργο η θερμογράφηση πρέπει να γίνεται σε συγκεκριμένη ώρα της ημέρας, ώστε να προσπίπτει το σωστό ποσό ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να γίνει γρήγορα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό περιθώριο της ημέρας. Για αυτό το λόγο, η χρήση drone είναι η ιδανική λύση.
- *Σωστή γωνία λήψης:* Σε κάθε θερμογράφηση η θερμοκάμερα πρέπει να στοχεύει στα πάνελ υπό τη σωστή γωνία. Στην περίπτωση της χρήσης drones, αυτή η γωνία ρυθμίζεται από τον χρήστη πριν την πτήση, στην ιδανική τιμή που πρέπει να έχει, σύμφωνα με τους κανονισμούς.

-
- *Λήψη απεικονίσεων ακόμα και σε πάνελ με δύσκολη πρόσβαση:* σε περίπτωση μιας εγκατάστασης βιομηχανικών φωτοβολταϊκών στέγης όπου η πρόσβαση, για παράδειγμα, στη βιομηχανική στέγη είναι επικίνδυνη, αν όχι αδύνατη, για τα πάνελ της εγκατάστασης αλλά κυρίως για τον πεζό θερμογράφο, η χρήση drone ενδείκνυται ως η ασφαλέστερη λύση (ανεξαρτήτως του μεγέθους της θερμογραφούμενης εγκατάστασης).
 - *Λιγότερες λήψεις/απεικονίσεις:* η θέση των προβληματικών πάνελ και το είδος του προβλήματος καταγράφονται σε μία και μόνο εικόνα, όπου απεικονίζεται η θερμογραφημένη κάτοψη της καλυμμένης με φωτοβολταϊκά στέγης. Σε μία αχανή έκταση είναι πολύ δύσκολο και χρονοβόρο να σημειωθεί κατά τη θερμογράφιση από το έδαφος η ακριβής θέση του προβλήματος, κάτι κρίσιμο για την μετέπειτα επίσκεψη και επισκευή του συγκεκριμένου πάνελ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αξιόπιστη λειτουργία μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών είναι άμεσα συνυφασμένη με την λειτουργικότητα των επί μέρους στοιχείων που την απαρτίζουν. Οι βλάβες που παρουσιάζονται στις συγκεκριμένες μονάδες επηρεάζουν τόσο την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και την συνολική διάρκεια ζωής της, καθώς μια σοβαρή βλάβη μπορεί να θέσει εκτός λειτουργίας μια μονάδα για μεγάλο χρονικό διάστημα, ή και να την καταστρέψει ολοκληρωτικά, όπως για παράδειγμά λόγω μιας πυρκαγιάς από βραχυκύκλωμα. Για να εξασφαλίσουμε, λοιπόν, ότι η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση διατηρεί την λειτουργική της απόδοση στο μέγιστο δυνατό επίπεδο, η εκτέλεση περιοδικών εργασιών συντήρησης από εξειδικευμένο τεχνικό συνεργείο είναι η βέλτιστη ενδεδειγμένη λύση. Στην παρούσα πτυχιακή έγινε μια παρουσίαση των βλαβών οι οποίες συναντώνται συχνότερα στις εν λόγω μονάδες, και αφορούν κυρίως στα πάνελς, τους μετατροπείς τάσης και τους μετασχηματιστές, τις καλωδιώσεις, τα σημεία σύνδεσης και τα στηρίγματα.

Επίσης, καθώς η προληπτική συντήρηση είναι εξαιρετικής σημασίας για την λειτουργική αξιοπιστία τους, έγινε μια αναφορά και στις κυριότερες εργασίες προληπτικής συντήρησης των φωτοβολταϊκών οι οποίες συνίσταται να γίνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, όπως ο καθαρισμός των επιφανειών των πάνελς από επικαθίσεις, ο οπτικός και ηλεκτρονικός έλεγχος των καλωδιώσεων και των σημείων σύνδεσης, καθώς και μια αρκετά χρήσιμη μέθοδος, αυτή της θερμογράφησης. Αξίζει να τονιστεί, πάντως, ότι έως και σήμερα δεν υπάρχει μια κοινή προσέγγιση όλων των ιδιοκτητών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων παγκοσμίως όσον αφορά τον καθορισμό συγκεκριμένων εργασιών συντήρησης στις φωτοβολταϊκές μονάδες, καθώς και στον τρόπο αντιμετώπισης των βλαβών που παρουσιάζονται. Κρίνεται, επομένως, επιτακτική η ανάγκη για την ανάπτυξη μιας κοινής μεθοδολογίας εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών μεταξύ των κατασκευαστών φωτοβολταϊκών και των εξαρτημάτων τους, η οποία να βασίζεται στην ανταλλαγή πληροφοριών και στατιστικών στοιχείων με βάση τα έως τώρα λειτουργικά τους δεδομένα, ώστε να βελτιωθεί η λειτουργική τους αξιοπιστία, και κατ'επέκταση η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον μέγιστο δυνατό βαθμό, κάτι το οποίο είναι προς όφελος τόσο των ιδιοκτητών των φωτοβολταϊκών μονάδων, όσο και της κοινωνίας, γενικότερα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. *Encyclopédie de l'Energie*, Photovoltaic Solar Power: Technologies and their trajectory, διαθέσιμο από: <https://www.encyclopedie-energie.org/en/photovoltaic-solar-power-technologies-trajectory/>
- [2]. International Energy Agency (IEA) Solar PV Forecast Overview, διαθέσιμο από: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020/solar-pv>
- [3]. W. Strunk Jr., E.B. White, *The Elements of Style*, third ed., Macmillan, New York, 1979.
- [4]. D. Lincot, The new paradigm of photovoltaics: from powering satellites to powering humanity, *Comptes Rendus Physique*. 18 (2017) 381–390.
- [5]. A. Jäger-Waldau, Snapshot of photovoltaics – February 2020, *Energies*. 13:4 (2020) 930
- [6]. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Best practices for operation and maintenance of photovoltaic and energy storage systems, 3rd edition, December 2018
- [7]. Γουδουσάκης Σ. Φωτοβολταϊκά Συστήματα, διαθέσιμο από: <http://www.lagadas.net/index.php?act=viewProd&productId=747>
- [8]. Taraba et al, Properties measurement of the thin film solar panels under adverse weather conditions, *Transportation Research Procedia* 40 (2019) 535-540
- [9]. Flicker, J. et al. 2012, “PV inverter performance and reliability: What is the role of the bus capacitor?”, *Proc. 38th IEEE PVSC*, Austin, Texas, USA, 1–3
- [10]. Technical failures in PV Projects, διαθέσιμο από: www.pv-tech.org
- [11] IEA Task 13: Service life estimation for photovoltaic modules 2021 (Report IEA -PVPS T13-16:2021)
- [12]. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) Εθνικός Ενεργειακός Χάρτης 2020: Η μελλοντική πορεία του ενεργειακού συστήματος, διαθέσιμο από: <http://www.opengov.gr/minenv/?p=4204>
- [13]. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Best Research-Cell Efficiency Chart, διαθέσιμο από: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [14]. Scholtz L. et al. 2017 “Renewable Energy: Facts and Futures” WWF Report
- [15]. Inverters: ο εγκέφαλος των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, διαθέσιμο από: <https://www.4green.gr/news/data/fwtoboltaika/96880.asp>
- [16]. Olympic Engineering & Consulting, διαθέσιμο από: <https://www.oleng.eu/>
- [17]. ΔΕΔΔΗΕ: Τεχνικό εγχειρίδιο για την εγκατάσταση της μετρητικής διάταξης παραγωγής στις εσωτερικές εγκαταστάσεις αυτοπαραγωγών με ενεργειακό συμψηφισμό (net metering)
- [18]. ALUMILSOLAR διαθέσιμο από: <https://www.alumilsolar.com>
- [19]. Al-Rousan et al, Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018) 2548-2569
- [20]. Διαθέσιμο από: www.sunnyportal.com
- [21]. Liu Q. et al , Power quality management of PV power plant with transformer integrated filtering method, *IEEE Transactions on Power Delivery* 2019
- [22]. Διαθέσιμο από: <https://www.ti-soft.com>
- [23]. Malvoni et al , Performance and degradation assessment of large-scale grid -connected solar photovoltaic power plant in tropical semi-arid environment of India, *Solar Energy* 203 (2020) 101-113
- [24]. Clover I., PID, Soiling and module degradation in hot climates, www.pv-magazine.com, Issue 09-2017

-
- [25]. Bouaichi et al, 2019, Experimental investigation of potential induced degradation impact and recovery on crystalline photovoltaic systems, Proceedings of the 1st International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy (pp.623-629)
- [26]. Maghami et al , Power loss due to soiling on solar panel: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (2016) 1307-1316
- [27]. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 13 - Subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic modules , March 2014, ISBN 978-3-906042-16-9
- [28]. Τι προβλήματα λύνει η θερμογράφηση των φωτοβολταϊκών πάνελ - Case study θερμογράφησης με drone, διαθέσιμο από:
<https://www.b2green.gr/el/runmyproject/post/58615/ti-provlimata-lynei-i-thermografisi-ton-fotovoltaikon-panel-case-study-thermografisi-me-drone>
- [29]. Bosman et al, PV System predictive maintenance : challenges, current approaches and opportunities, Energies 2020 (13) , 1398
- [30]. Alghamdi et al, Dust removal from solar PV modules by automated cleaning systems, Energies 2019, 12 (15) 2923
- [31]. Grando M. et al, Robots for cleaning photovoltaic panels: state of the art and future prospects, Conference: IX JORNADAS ARGENTINAS DE ROBÓTICA, Córdoba – Argentina, November 2017
- [32]. Schill S., Brachmann S., Koehl M., Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules, Solar Energy 112, 259-262
- [33]. KIEFER: Πότε ένα παλιό φωτοβολταϊκό πάυει να παράγει ηλιακή ενέργεια, Διαθέσιμο από: <https://kiefer.gr/el/pote-ena-palio-fotovoltaiko-pavei-na-p/>
- [34]. Kaplani E., Ageing effects in PV cells and modules, Innovation week on RES, 1-12 July 2012, Patras, Greece
- [35]. What to do when hailstorms impact the solar module, Διαθέσιμο από:
<https://www.pveurope.eu/maintenance/hot-tips-what-do-when-hailstorms-impact-solar-module>
- [36]. Fire accident at Argentinian solar park ‘s central inverters, October 21st 2010, Διαθέσιμο από: <https://www.pv-magazine.com/2020/10/21/fire-accident-at-argentinian-solar-parks-central-inverters/>
- [37]. Solar Fires – DC Arc Faults, Διαθέσιμο από:
<https://www.acsolarwarehouse.com/news/solar-fires-dc-arc-faults-on-solar-systems/>
- [38]. Protecting your solar from pests, Διαθέσιμο από: www.ontario-solar-installers.ca
- [39]. Zhao Y. et al, Fault analysis in solar PV arrays under low irradiance conditions and reverse connections, Conference of the IEEE Photovoltaic Specialists, June 2011
- [40]. Πυργιώτη Ε. Υποσταθμοί Μέσης Τάσης, Διαθέσιμο από:
<https://www.electrologos.gr/ypostathmoi-mesis-tasis/>
- [41]. Gilani, Amir & Whittaker, Andrew & Fenves, Greg. (1999). Seismic evaluation of 550 kV porcelain transformer bushings. 10.13140/RG.2.1.4994.2649.
- [42]. Leaking Transformer: Regasketing, Διαθέσιμο από: www.transformermaintenance.com
- [43]. 10 Λάθη στην αποθήκευση ενέργειας, Διαθέσιμο από:
<https://www.4green.gr/news/data/diafora/104632.asp>
- [44]. Wagman D. , 2020 Dispute erupts over what sparked an explosive Li-ion energy storage accident, Διαθέσιμο από: <https://spectrum.ieee.org/dispute-erupts-over-what-sparked-an-explosive-liion-energy-storage-accident>
- [45]. Finsterle T. et al, Diagnostics of PID early stage in PV systems, Energies 2021, 14, 2155
- [46]. International Energy Agency (IEA): Review of failures of photovoltaic modules, Report IEA-PVPS T13-01:2014
- [47]. Zefri et al, Thermal infrared and visual inspection of photovoltaic installations by UAV Photogrammetry, Drones 2018, 2, 41; doi:10.3390/drones20

