

Εκτίμηση της Διακινδύνευσης σε Φωτοβολταϊκούς Σταθμούς με την Τεχνική HAZOP (Hazard & Operability Study)

Γεώργιος Τζεβελέκος

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε και Μεταπτ. Φοιτητής
ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

giorgos.tzevelekos@gmail.com, std149135@ac.eap.gr

Μαρχαβίλας Παναγιώτης

Ηλεκτρολόγος Μηχ/κός & Μηχ/κός Η/Υ (Dipl., MSc, PhDx2)
και Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

marchavilas.panagiotis@ac.eap.gr , marhaval@pme.duth.gr

Περίληψη - Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην ανάλυση και αξιολόγηση του επαγγελματικού κινδύνου που συνδέεται με τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω της εφαρμογής της μεθόδου HAZOP (Hazard and Operability Study). Η μέθοδος HAZOP θεωρείται μία από τις πλέον κατάλληλες τεχνικές εκτίμησης κινδύνου για τον εντοπισμό πιθανών αστοχιών και κινδύνων στη λειτουργία των εγκαταστάσεων. Στην αρχή της εργασίας, πραγματοποιείται σύγκριση με άλλες διαδεδομένες τεχνικές εκτίμησης κινδύνου βάσει του προτύπου ISO/IEC 31010:2019. Η ανάλυση HAZOP προχωρά μέσα από προσεκτικά οργανωμένα βήματα που περιλαμβάνουν την προετοιμασία, την εξέταση και την τεκμηρίωση των ανιχνευμένων κινδύνων. Κατά τη διαδικασία αυτή, πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση των διαφόρων στοιχείων του συστήματος με στόχο την εντοπισμό και την αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων λειτουργίας. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια ενδεικτική μελέτη περίπτωσης που εφαρμόζεται σε έναν συγκεκριμένο επίγειο φωτοβολταϊκό σταθμό, η οποία αναλύει την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου HAZOP σε πραγματικό περιβάλλον και παρέχει σημαντικά δεδομένα για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Τα αποτελέσματα και οι συστάσεις που προκύπτουν από αυτή τη μελέτη υπογραμμίζουν τη σημασία της ανάλυσης κινδύνου στον τομέα της φωτοβολταϊκής ενέργειας και προτείνουν συγκεκριμένα μέτρα για την αποτελεσματική διαχείριση των εντοπισμένων κινδύνων. Συγκεκριμένα, προτείνονται τεχνολογικές λύσεις για την ανίχνευση και αντιμετώπιση κινδύνων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και προγράμματα συνεχιζόμενης εκπαίδευσης και επιμόρφωσης για το προσωπικό, ώστε να παραμένουν ενημερωμένοι για τις βέλτιστες πρακτικές και τις νέες τεχνολογίες. Οι προτάσεις αυτές μπορούν να συμβάλουν στη συνεχή βελτίωση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών σταθμών, προωθώντας παράλληλα τη βιώσιμη ανάπτυξη της ανανεώσιμης ενέργειας.

Λέξεις-Κλειδιά: Κίνδυνος, Διαχείριση Κινδύνου, HAZOP, Εκτίμηση Επαγγελματικού Κινδύνου, Εργασίες σε Φωτοβολταϊκούς σταθμούς

Ι.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και αξιολόγηση του επαγγελματικού κινδύνου που συνδέεται με τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω της εφαρμογής της μεθόδου HAZOP (Hazard and Operability Study). Η μέθοδος HAZOP θεωρείται μία από τις πλέον κατάλληλες τεχνικές εκτίμησης κινδύνου για τον εντοπισμό πιθανών αστοχιών και κινδύνων στη λειτουργία των εγκαταστάσεων.

Στην αρχή της μελέτης, πραγματοποιείται σύγκριση με άλλες διαδεδομένες τεχνικές εκτίμησης κινδύνου βάσει του προτύπου ISO/IEC 31010:2019.

Η μέθοδος HAZOP οργανώνεται σε συγκεκριμένα βήματα, τα οποία περιλαμβάνουν την προετοιμασία, την ανάλυση και την τεκμηρίωση των εντοπισμένων κινδύνων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση των διαφόρων στοιχείων του συστήματος, με στόχο την αναγνώριση και αντιμετώπιση πιθανών κινδύνων που μπορεί να προκύψουν κατά τη λειτουργία. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται και αξιολογείται σε μια συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης ενός επίγειου φωτοβολταϊκού σταθμού, προσφέροντας έτσι ουσιαστικά δεδομένα για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς της.

Η αυξανόμενη χρήση φωτοβολταϊκών σταθμών για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας καθιστά αναγκαία την ύπαρξη ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης κινδύνου. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί, ως σύνθετα τεχνικά συστήματα, παρουσιάζουν συγκεκριμένους κινδύνους που μπορούν να επηρεάσουν τόσο την ασφάλεια των εργαζομένων όσο και την απόδοση των εγκαταστάσεων. Η εφαρμογή της μεθόδου HAZOP σε αυτούς τους σταθμούς επιτρέπει την αναγνώριση, την αξιολόγηση και την αντιμετώπιση των κινδύνων με συστηματικό τρόπο.

Η μέθοδος HAZOP εφαρμόζεται μέσω μιας σειράς οργανωμένων συναντήσεων όπου συμμετέχουν ειδικοί από διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών, των τεχνικών ασφαλείας και των υπευθύνων λειτουργίας. Οι συμμετέχοντες χρησιμοποιούν καθοδηγητικές λέξεις-κλειδιά για να εντοπίσουν πιθανές αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία του συστήματος και να συζητήσουν τις πιθανές αιτίες και συνέπειες αυτών των αποκλίσεων. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την αναλυτική και συστηματική εξέταση των λειτουργικών διαδικασιών και την ταυτοποίηση των περιοχών που απαιτούν βελτίωση. Η εφαρμογή της μεθόδου HAZOP περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- **Προετοιμασία:** Καθορίζονται οι στόχοι της μελέτης και επιλέγεται η ομάδα εργασίας. Αναλύεται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού σταθμού και συγκεντρώνονται τα απαραίτητα δεδομένα.
- **Ανάλυση:** Πραγματοποιείται λεπτομερής εξέταση των επιμέρους στοιχείων του συστήματος με τη χρήση καθοδηγητικών λέξεων-κλειδιά. Εντοπίζονται οι πιθανές αποκλίσεις, οι αιτίες και οι συνέπειες τους.
- **Τεκμηρίωση:** Καταγράφονται τα ευρήματα της ανάλυσης, οι προτεινόμενες δράσεις και τα μέτρα αντιμετώπισης των κινδύνων.

Η μέθοδος HAZOP επιτρέπει την αναλυτική και συστηματική εξέταση των λειτουργικών διαδικασιών και την ταυτοποίηση των περιοχών που απαιτούν βελτίωση. Μέσω της διαδικασίας αυτής, διασφαλίζεται ότι όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι εξετάζονται και αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο αποτυχιών και αυξάνοντας την αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών σταθμών.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

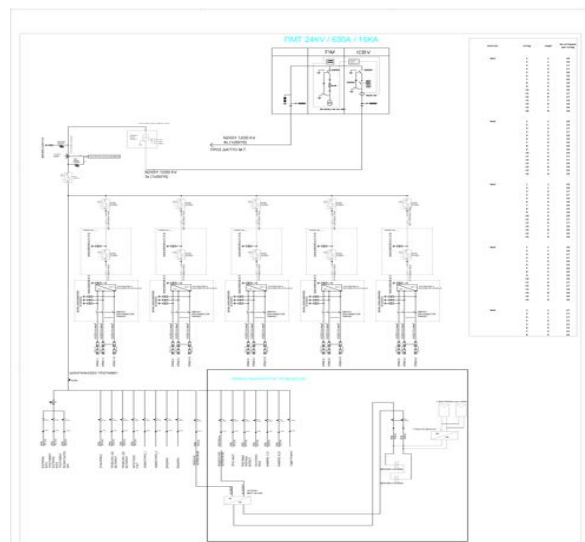
Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας βασίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου HAZOP για την εκτίμηση των επαγγελματικών κινδύνων σε φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Η μέθοδος HAZOP είναι μια δομημένη και συστηματική διερεύνηση μιας υπό σχεδίασης ή υπάρχουσας διαδικασίας ή συστήματος, με στόχο την αναγνώριση πιθανών αποκλίσεων από τον σχεδιασμό, την εξέταση των πιθανών αιτιών και συνεπειών τους και την πρόταση λύσεων για την αντιμετώπισή τους.

Η μέθοδος HAZOP χρησιμοποιείται για τη βελτίωση του σχεδιασμού και τον εντοπισμό κινδύνων που σχετίζονται με αλλαγές στον σχεδιασμό. Η διαδικασία της μεθόδου HAZOP περιλαμβάνει την ανάλυση των διαφόρων στοιχείων του συστήματος με στόχο τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση των πιθανών κινδύνων λειτουργίας. Η μέθοδος HAZOP ακολουθεί μια σειρά βημάτων που περιλαμβάνουν την προετοιμασία της εξέτασης, τη συλλογή δεδομένων, την ανάλυση των κινδύνων, την τεκμηρίωση των ευρημάτων και την παρακολούθηση των προτεινόμενων μέτρων.

Η εφαρμογή της μεθόδου HAZOP σε φωτοβολταϊκούς σταθμούς περιλαμβάνει την ανάλυση των υποσυστημάτων του σταθμού, όπως οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες, οι αντιστροφείς και οι υποσταθμοί χαμηλής και μέσης τάσης. Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες είναι τα στοιχεία που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι πιθανοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν τις αστοχίες υλικών και την ανεπαρκή συντήρηση. Οι αντιστροφείς μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα που παράγεται από τους συλλέκτες σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Κίνδυνοι περιλαμβάνουν τις ηλεκτρικές βλάβες, την υπερθέρμανση και την αστοχία των εξαρτημάτων. Ο υποσταθμός είναι υπεύθυνος για τη διανομή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Πιθανοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν τις ηλεκτρικές βλάβες, τις εκρήξεις και την αστοχία των εξαρτημάτων.

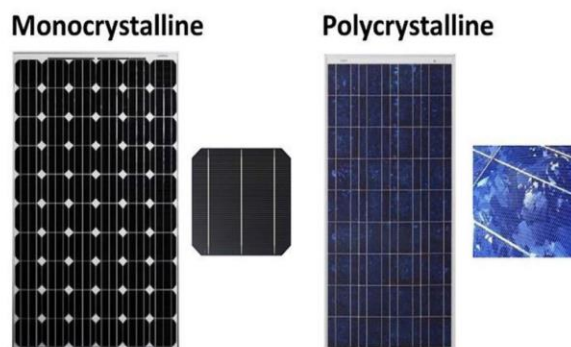
III. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της μεθόδου HAZOP πραγματοποιήθηκε σε συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό σταθμό επί εδάφους, επικεντρώνοντας την ανάλυση στα υποσυστήματα του σταθμού, όπως οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες, οι αντιστροφείς και οι υποσταθμοί χαμηλής και μέσης τάσης. Στο σχήμα 1. παρουσιάζεται το μονογραμμικό σχέδιο του φωτοβολταϊκού σταθμού



Σχήμα 1. Μονογραμμικό σχέδιο φωτοβολταϊκού σταθμού

Η ανάλυση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών (βλ. Σχήμα 2) ανέδειξε ότι οι κύριοι κίνδυνοι περιλαμβάνουν αστοχίες υλικών και ανεπαρκή συντήρηση. Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες, ως τα στοιχεία που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, είναι κρίσιμα για την αποτελεσματική λειτουργία του σταθμού. Η ανάλυση έδειξε ότι η ακεραιότητα των υλικών και η τακτική συντήρηση είναι ουσιώδεις για την αποφυγή βλαβών και την εξασφάλιση της συνεχούς παραγωγής ενέργειας.



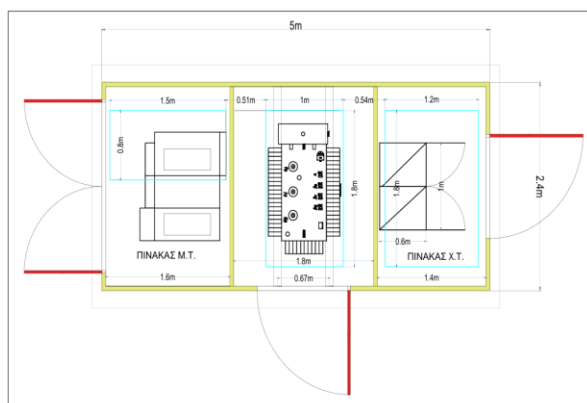
Σχήμα 2. Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες

Η ανάλυση των αντιστροφέων (βλ. Σχήμα 3), που είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, ανέδειξε κινδύνους όπως ηλεκτρικές βλάβες, υπερθέρμανση και αστοχία εξαρτημάτων. Οι αντιστροφείς αποτελούν κρίσιμο σημείο της εγκατάστασης, καθώς οποιαδήποτε δυσλειτουργία μπορεί να διακόψει την παραγωγή και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση πρότεινε μέτρα για την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων κινδύνων, όπως βελτιώσεις στο σύστημα ψύξης, τακτικοί έλεγχοι και συντήρηση των εξαρτημάτων, καθώς και εγκατάσταση συστημάτων παρακολούθησης.



Σχήμα 3. Αντιστροφέας/Inverter

Η ανάλυση των υποσταθμών (βλ. Σχήμα 4), που διανέμουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, έδειξε κινδύνους όπως ηλεκτρικές βλάβες, εκρήξεις και αστοχία εξαρτημάτων. Οι υποσταθμοί είναι υπεύθυνοι για τη σταθερή και ασφαλή διανομή της ενέργειας στο δίκτυο, και οποιαδήποτε αστοχία μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία του σταθμού και στην παροχή ενέργειας. Η ανάλυση κατέληξε σε προτάσεις για την ενίσχυση της ασφάλειας των υποσταθμών, όπως βελτιώσεις στην ανίχνευση βλαβών, ενίσχυση της προστασίας από υπερτάσεις και αναβάθμιση των συστημάτων ασφαλείας.



Σχήμα 4. Κάτοψη υποσταθμού

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταγράφηκαν λεπτομερώς και προτάθηκαν μέτρα για την αντιμετώπιση των εντοπισμένων κινδύνων. Συγκεκριμένα, προτάθηκαν τακτικές συντηρήσεις και επιθεωρήσεις του εξοπλισμού, εκπαίδευση του προσωπικού στη διαχείριση κινδύνων και χρήση προηγμένων τεχνολογιών για την ανίχνευση και αντιμετώπιση κινδύνων.

Η μελέτη HAZOP επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην αναγνώριση και αντιμετώπιση των κινδύνων που συνδέονται με τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών σταθμών. Οι λεπτομερείς αναλύσεις των υποσυστημάτων (βλ. Σχήμα 5 Φύλλο εργασίας HAZOP) ανέδειξαν σημαντικούς κινδύνους που σχετίζονται με τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, των αντιστροφών και των υποσταθμών. Η αναγνώριση και η αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της ασφάλειας και της

λειτουργικότητας των φωτοβολταϊκών σταθμών.

ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ - Ανάλυση κινδύνων με τη μέθοδο HAZOP													
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ													
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ													
ΣΥΝΤΑΚΤΗΣ: ΠΕ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος, ΓΠ Πάριος													
Α/Α	Παράμετρος, λειτουργία	Συνθήκη Εξέλιξης	Αιτία Οδήγης	Αποδοχή	Πόλεος, Αιτία	Επίπτωση	Προηγμένη ανάλυση κινδύνου			Μέτρα Προστασίας	Προβλεπόμενα HAZOP	Μεταγενέστερη ανάλυση κινδύνου	
							ΠΕ	ΓΠ	ΑΠ			ΠΕ	ΓΠ
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

Σχήμα 5. Φύλλο εργασίας HAZOP

Επιπλέον, για την ιεράρχηση των αποτελεσμάτων της μελέτης HAZOP, εφαρμόστηκε η μέθοδος DMRA (Decision Matrix Risk Assessment). Η μέθοδος DMRA είναι μια συστηματική και ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για την αξιολόγηση του κινδύνου, βασισμένη στην κατηγοριοποίηση της σοβαρότητας των επιπτώσεων και της πιθανότητας εμφάνισης ενός κινδύνου. Κάθε κίνδυνος που εντοπίστηκε στη μελέτη HAZOP αντιστοιχίστηκε με μια τιμή σοβαρότητας επιπτώσεων και μια τιμή πιθανότητας εμφάνισης. Μέσω αυτής της αντιστοίχισης, ήταν δυνατή η τοποθέτηση των συγκεκριμένων κινδύνων στη μήτρα απόφασης (Decision Matrix), καθορίζοντας έτσι την κατηγορία στην οποία ανήκουν οι κίνδυνοι και την προτεραιότητα αντιμετώπισής τους.

Η εφαρμογή της μεθόδου DMRA επέτρεψε την ποσοτικοποίηση και την ιεράρχηση των κινδύνων που εντοπίστηκαν στη μελέτη HAZOP, διευκολύνοντας την ανάπτυξη στοχευμένων μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης των κινδύνων. Τα αποτελέσματα της συνδυαστικής εφαρμογής των μεθόδων HAZOP και DMRA κατέδειξαν την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μέτρων στην αντιμετώπιση των κινδύνων και στη βελτίωση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας των φωτοβολταϊκών σταθμών.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα της παρούσης μελέτης υπογραμμίζουν τη σημασία της ανάλυσης κινδύνων για τη βελτίωση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας των φωτοβολταϊκών σταθμών. Προτείνονται συγκεκριμένα μέτρα για τη διαχείριση των εντοπισμένων κινδύνων, όπως η εφαρμογή τακτικής συντήρησης και επιθεωρήσεων του εξοπλισμού, η εκπαίδευση των προσωπικού στη διαχείριση κινδύνων και η χρήση προηγμένων τεχνολογιών για την ανίχνευση και αντιμετώπιση κινδύνων.

Η εφαρμογή της μεθόδου HAZOP αποδεικνύεται αποτελεσματική στην αναγνώριση και αντιμετώπιση κινδύνων, συμβάλλοντας στην αύξηση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η μελέτη αυτή αποτελεί μια σημαντική συμβολή στην κατανόηση των κινδύνων που συνδέονται με τη λειτουργία φωτοβολταϊκών σταθμών και προτείνει πρακτικές λύσεις για την αντιμετώπισή τους.

Η παρούσα ανάλυση και τα ευρήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη προληπτικών μέτρων, με στόχο τη συνεχή βελτίωση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Η σημασία της

συνεχούς παρακολούθησης και της επικαιροποίησης των μεθόδων εκτίμησης κινδύνων αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και την επιτυχία των φωτοβολταϊκών έργων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- IEC 61882. (2016). Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide
31010. (2019). Risk management - Risk assessment techniques. Crawley, F., & Tyler, B. (2015). HAZOP: Guide to best practice. Elsevier.
- Basu, S., & Basu, S. (2017). Basics of hazard, risk ranking, and safety systems. Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems, 2017, 1-81.
- Kloman, F. (2010). A brief history of risk management. Enterprise risk management: Today's leading research and best practices for tomorrow's executives, 9-29.
- Basu, S., & Basu, S. (2017). Basics of hazard, risk ranking, and safety systems. Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems, 2017, 1-81.
- Marhavilas, P. K., Filippidis, M., Koulinas, G. K & Koulouriotis, D. E. (2019). The integration of HAZOP study with risk-matrix and the analytical-hierarchy process for identifying critical control points and prioritizing risks in industry – A case study. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol 62.
- Marhavilas, P. K., Filippidis, M., Koulinas, G. K & Koulouriotis, D. E. (2020). An expanded HAZOP study with fuzzy-AHP (XPA-HAZOP technique): Application in a sour crude-oil processing plant. Safety Science, Vol 124.
- Δαμιανίδης Μωυσής, Γεώργιος Κατσαρός, Ματθαίος Τόλης, Φώτιος Στεργιόπουλος (2011) Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας.
- Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC). (1990). IEC 60298: Πίνακες Μέσης Τάσης Με Μεταλλικό Περιβλήμα (1 To 52 kV). IEC.
- Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC). (2002). IEC 60694: Κοινές διατάξεις για τα πρότυπα υψηλής τάσης (2η έκδοση). IEC.