



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ
Φ/Β ΠΑΡΚΟ

ΔΑΝΑΗ ΔΑΜΙΑΝΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΧΑΡΗΣ ΔΟΥΚΑΣ
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα Φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, εξαιτίας της θέσης εγκατάστασής τους, είναι εκτεθειμένα σε κεραυνικά πλήγματα, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στο Φ/Β εξοπλισμό, με αποτέλεσμα να υπάρξουν δυσλειτουργίες σε ολόκληρο το σύστημα, υψηλό κόστος επισκευής και οικονομική ζημία. Έτσι, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός κατάλληλου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) είναι υψίστης σημασίας για την ασφάλη και απρόσκοπτη λειτουργία των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Σε αυτή την εργασία, αξιολογούνται διαφορετικά συστήματα εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας μιας Φ/Β εγκατάστασης 100kWp με τη χρήση ενός σχεσιακού μοντέλου αποφάσεων καθώς και ενός μοντέλου πρόσθετης αξίας, τα οποία βασίζονται σε οικονομικά, τεχνικά, και κριτήρια ασφάλειας και αξιολογείται με τη βοήθεια των μεθόδων PROMETHEE II και UTASTAR αντίστοιχα. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα αναμένονται να είναι ένας οδηγός για την αποτελεσματική σχεδίαση των τοπολογιών των Φ/Β συστημάτων, αυξάνοντας την αξιοπιστία τους και συμβάλλοντας στη βελτίωση της κεραυνικής συμπεριφοράς τους. Και οι δύο μέθοδοι δίνουν την ίδια βέλτιστη λύση, ωστόσο το προσθετικό μοντέλο είναι αυτό που οδηγεί στην ανάλυση την ευστάθειας.

Λέξεις κλειδιά: Πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων, PROMETHEE II, UTASTAR, Φωτοβολταϊκά συστήματα, Αλεξικέραυνο

ABSTRACT

Photovoltaic (PV) systems, due to their installation position, are exposed to significant lightning discharges. These can damage the PV equipment, resulting malfunctions on the entire system, high repair costs and financial losses. Thus, the design and construction of an adequately shielded lightning protection system (LPS) is of utmost importance for the safe and uninterrupted operation of photovoltaic installations. In this paper, different external lightning protection systems of a 100kWp PV installation are evaluated with the use of a relational model and an additive value model, which is based on economic, technical, and safety criteria and is assessed by means of the PROMETHEE II method and UTASTAR ordinal regression method. The emerging results are expected to be a guide for the efficient design of the PV systems topologies, increasing their reliability and contributing to the improvement of their lightning performance. Both methods give the same result, however it is the additive value model that leads to robust evaluation.

Key words: Multiple criteria decision analysis, PROMETHEE II, UTASTAR, Photovoltaic systems; Lightning protection

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	8
2.1 Σχεσιακό Μοντέλο	9
2.1.1 Μέθοδοι PROMETHEE	10
2.1.2 Προσδιορισμός Βαρών	12
2.2. Αναλυτικό - Συνθετικό μοντέλο	13
2.2.1 Προσθετικό μοντέλο	14
2.2.2 Μέθοδοι UTA-UTASTAR	16
2.2.3 Ανάλυση ευστάθειας.....	20
ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	21
3.1 Εξωτερικό και εσωτερικό ΣΑΠ	21
3.2 Μελέτη Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας	24
3.2.1 Αποτίμηση κινδύνου από κεραυνικό πλήγμα	24
3.2.2 Συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή.....	24
3.2.3 Διαδικασία επιλογής του ΣΑΠ.....	28
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	29
4.1 Περιγραφή συστήματος	29
4.2 Διαδικασία επιλογής Στάθμης Προστασίας	32
4.3 Προσομοίωση συλλεκτήριου συστήματος εξωτερικής εγκατάστασης αντικεραυνικής προστασίας	33
4.4 Μοντελοποίηση προβλήματος	34
4.5 Σχεδιασμός Κριτηρίων Αξιολόγησης.....	38
ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	41
5.1 Εφαρμογή μεθόδου PROMETHEE II.....	41

5.1.1 Υπολογισμός βαρών	41
5.1.2 Συναρτήσεις προτίμησης	42
5.1.3 Ροές υπεροχής και κατάταξη	42
5.2 Εφαρμογή μεθόδου UTASTAR	43
5.2.1 Α' φάση.....	43
5.2.2 Β' φάση.....	47
5.2.3 Γ' φάση	50
5.2.4 Εφαρμογή σε αληθινά δεδομένα.....	55
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	63



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κεραυνικά πλήγματα αποτελούν συνήθη αιτία σφαλμάτων σε ΦΒ συστήματα, με αποτέλεσμα την πιθανή καταστροφή εξοπλισμού και τη διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης. Τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα προσβάλλουν είτε τμήματα του ΦΒ είτε το εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, και μπορεί να οδηγήσουν σε διάσπαση της μόνωσης και αύξηση του δυναμικού της γης, αντίστοιχα. Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται λόγω του κεραυνικού ρεύματος επάγει τάσεις στους σχηματιζόμενους από τους αγωγούς βρόχους του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά του ΦΒ, το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (εάν υπάρχει), τα χαρακτηριστικά του κεραυνικού ρεύματος και η θέση κεραυνοπληξίας είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν τη σοβαρότητα των πιθανών σφαλμάτων και των συνεπαγόμενων καταστροφών.

Το Ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 1197 που βασίζεται στο IEC 61024-1 και αφορά στην αντικεραυνική προστασία δε προτείνει συγκεκριμένα κριτήρια για την επιλογή των στοιχείων που απαρτίζουν το συλλεκτήριο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Οι ράβδοι, τα τεταμένα σύρματα και το πλέγμα αγωγών θεωρούνται στοιχεία ισοδύναμα μεταξύ τους. Ο σχεδιασμός του συλλεκτήριου συστήματος του ΣΑΠ θεωρείται κατάλληλος εάν η κατασκευή που χρήζει προστασίας κείται εξ'ολοκλήρου μέσα στη ζώνη προστασίας που αυτό παρέχει. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως, ενώ υπάρχει τυποποίηση για συνήθεις εγκαταστάσεις (κτιριακές εγκαταστάσεις, υποσταθμοί κ.α.), ο ολοένα αυξανόμενος χώρος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας χρήζει ανάλυσης.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη και σύγκριση δύο πολυκριτηριακών μοντέλων για την υποστήριξη της επιλογής του κατάλληλου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας σε Φ/Β πάρκο 100kWp. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένα σύστημα τεσσάρων κριτηρίων αξιολόγησης, τα οποία διακρίνονται σε τρεις άξονες προτίμησης: α) οικονομικά, β) τεχνικά και γ) κριτήρια ασφάλειας. Έτσι, σχεδιάζονται και αναλύονται εναλλακτικά συλλεκτήρια συστήματα αντικεραυνικής προστασίας που συναντώνται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις χρησιμοποιώντας εξοπλισμό διαθέσιμο στην Ελλάδα. Εξετάζεται η καταλληλότητα και αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων σύμφωνα με τη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας και

τα αποτελέσματα προσομοίωσης του λογισμικού πακέτου WinIGS με σκοπό τη πολυκριτήρια ανάλυση των συστημάτων αυτών. Χρησιμοποιείται η σχεσιακή μέθοδος PROMETHEE II και η αναλυτική μέθοδος UTASTAR (η οποία διευκολύνει την αποτύπωση του προτιμησιακού μοντέλου του αποφασίζοντος). Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μεθόδων. Επιπροσθέτως, το μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αξιολόγηση μελλοντικών δράσεων γεγονός που ενισχύει τη χρησιμότητα της ανάλυσης αυτής.

Δομή και οργάνωση κειμένου

Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρέχεται ένα περίγραμμα του αντικειμένου της εργασίας, στο πεδίο που αναφέρεται και στα θέματα που πραγματεύεται, καθώς επίσης και το σκοπό τον οποίο φιλοδοξεί να επιτύχει.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται εισαγωγή στην έννοια και στην θεωρία της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων. Παρουσιάζεται αναλυτικά το σχεσιακό καθώς και το προσθετικό μοντέλο αξίας και ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται σε προβλήματα αξιολόγησης. Περιγράφεται διεξοδικά το μαθηματικό πλαίσιο των μεθόδων PROMETHEE και UTA-UTASTAR που θα χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναλύονται τα εξωτερικά και εσωτερικά συστήματα αντικεραυνικής προστασίας και μελετάται η εκτίμηση του κινδύνου και η συχνότητα των κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το πρόβλημα που θα επιχειρηθεί να λυθεί εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μεθοδολογία. Περιγράφεται το πλαίσιο μέσα στο οποίο θα γίνει η εφαρμογή των μοντέλων και γίνονται κατανοητοί οι λόγοι που καθιστούν χρήσιμη μια τέτοια αξιολόγηση.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** πραγματοποιείται η κατασκευή των μοντέλου σύμφωνα με την μεθοδολογία που έχει περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια και γίνεται πρακτική εφαρμογή αυτών.

Στο **έκτο κεφάλαιο**, εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα αναφορικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν.



ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Η αντιμετώπιση πολυάριθμων και αρκετά πολύπλοκων προβλημάτων εκτίμησης οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων (Multicriteria Decision Aid - MCDA ή Multicriteria Decision Making – MCDM). Η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων εστιάζει στην ανάδειξη της αντικρουόμενης φύσης των διαφόρων πτυχών τέτοιων προβλημάτων και προτείνει ένα τρόπο που θα τις φέρει σε συμβιβασμό στο πλαίσιο μίας διαφανής διαδικασίας. Η δόμηση καλά ορισμένων προβλημάτων και η θεώρηση πολλαπλών κριτηρίων οδηγεί σε πληρέστερες και καλύτερες αποφάσεις.

Βασικό χαρακτηριστικό και σημαντική διαφορά της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων από τις υπόλοιπες προσεγγίσεις της επιχειρησιακής έρευνας είναι ότι η σύνθεση των κριτηρίων αυτών πραγματοποιείται υπό το πρίσμα της ορθολογικής λήψης των αποφάσεων και του συστήματος προτιμήσεων και αξιών, το οποίο χρησιμοποιείται συνειδητά ή ασυνείδητα από τον αποφασίζοντα. Κατά αυτόν τον τρόπο, η πολυκριτήρια ανάλυση προκρίνει τον ενεργητικό ρόλο αυτού που αποφασίζει εξασφαλίζοντας την ενσωμάτωση των προτιμήσεών του κατά την διαδικασία ανάπτυξης των υποδειγμάτων. Με την ενσωμάτωση αυτή επιτυγχάνεται η αντικατάσταση της βέλτιστης λύσης (που δεν είναι δυνατό να είναι μοναδική σε ένα πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων), με ένα σύνολο ανεξάρτητων λύσεων (non-dominated solutions set). Η έννοια του συνόλου των ανεξάρτητων λύσεων σημαίνει για τον αποφασίζοντα ότι είναι αδύνατο να κινηθεί σε άλλη λύση πέρα από τα όρια του συνόλου αυτού χωρίς να θυσιάσει έστω κι ένα κριτήριο. Έτσι, είναι λογικό, να αναζητηθεί η βέλτιστη λύση στο εσωτερικό του συνόλου. Κατά κανόνα, λόγω του μεγάλου μεγέθους του συνόλου αυτού, είναι δύσκολο να παρουσιαστεί στον αποφασίζοντα και συνεπώς χρησιμοποιούνται εργαλεία που τον βοηθούν να εστιάζει στις επιθυμητές λύσεις.

Όπως φαίνεται, λοιπόν, η πολυκριτήρια ανάλυση ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για την εξέταση θεμάτων που αφορούν την ανάλυση, μαθηματική μοντελοποίηση και αναπαράσταση των προτιμήσεων που διέπουν την πολιτική λήψης αποφάσεων από την πλευρά αυτού που αποφασίζει. Βασικός στόχος της ανάλυσης είναι η παροχή των αναγκαίων πληροφοριών για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης των αποφάσεων, συμβάλλοντας στον εντοπισμό των

βασικών χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου προβλήματος και των ιδιαιτεροτήτων των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων.

Η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων είναι μια ενεργή περιοχή έρευνας από το 1970 και παρατηρείται ως η πιο γρήγορα εξελισσόμενη προσέγγιση στο πεδίο της επιχειρησιακής έρευνας. Υπάρχουν πολλοί οργανισμοί που ασχολούνται εντατικά με το πεδίο αυτό καθώς και την πρακτική εφαρμογή του στην διοίκηση επιχειρήσεων.

2.1 Σχεσιακό Μοντέλο

Η μοντελοποίηση των προτιμήσεων μέσω των σχεσιακών μοντέλων αποφάσεων πραγματοποιείται με διμερείς σχέσεις (binary relations), που ορίζονται στο σύνολο A των δράσεων. Η σχέση που δεσπόζει σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο είναι η σχέση υπεροχής (outranking relation).

Παρακάτω η σχέση υπεροχής S για κάθε ζεύγος $(a,b) \in A \times A$: $aSb \Leftrightarrow$ «α τουλάχιστον εξίσου καλή με b»

$$S = P \cup Q \cup I \quad (2.1)$$

Η σχέση υπεροχής εμπεριέχει τη σχέση της προτίμησης (ισχυρή P και ασθενής Q) και τη σχέση της αδιαφορίας I .

Η προτίμηση και η αδιαφορία μπορούν να προκύψουν από την υπεροχή, ενώ ταυτόχρονα μοντελοποιείται η σχέση ασυγκρισσιμότητας R . Εάν αγνοήσουμε την ασθενή προτίμηση για ένα ζεύγος δράσεων (a,b) , ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$aPb \Leftrightarrow aSb \text{ και } b \nmid a \quad (2.2)$$

a κυριαρχεί b : η a έχει τουλάχιστον καλύτερες αξιολογήσεις από την b

$$aIb \Leftrightarrow aSb \text{ και } bSa \quad (2.3)$$

a υπερέχει b : η a έχει τουλάχιστον καλύτερες αξιολογήσεις από την b στην πλειοψηφία των κριτηρίων και στα κριτήρια που υπερέχει η b οι διαφορές είναι μικρές

$$aRb \Leftrightarrow a \nmid b \text{ και } b \nmid a \quad (2.4)$$

Ανυπαρξία υπεροχής. Μοντελοποιείται η κατάσταση όπου ο αποφασίζων δεν μπορεί να συγκρίνει δύο δράσεις.

2.1.1 Μέθοδοι PROMETHEE

Η μέθοδος PROMETHEE θεωρείται μία από τις πιο αποδοτικές μεθόδους στην κατηγορία των σχέσεων υπεροχής. Η μέθοδος αυτή μπορεί αν διαχειριστεί ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια. Επίσης είναι σαφής ο προσδιορισμός των προτιμήσεων ανάμεσα σε πολλαπλές αποφάσεις.

Όπως και στις μεθόδους ELECTRE, τα κριτήρια υποτίθεται ότι έχουν σταθμιστεί από τον αποφασίζοντα μέσω συντελεστών βαρύτητας w_1, w_2, \dots, w_n που εκφράζουν τη σχετική σημαντικότητα των κριτηρίων με άθροισμα τη μονάδα:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (2.5)$$

Η μέθοδος PROMETHEE χρησιμοποιεί την έννοια του **γενικευμένου κριτηρίου** (generalised criterion) για να μοντελοποιήσει την αξία που ενδεχομένως αποδίδει ένας αποφασίζων στο εύρος της διαφοράς $[g_j(a) - g_j(b)]$ στο κριτήριο g_j για ένα ζεύγος δράσεων (a, b) . Τούτο γίνεται μέσω μιας **συνάρτησης προτίμησης** (preference function), που ορίζεται ως εξής:

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad \forall a, b \in A \quad (2.6)$$

όπου:

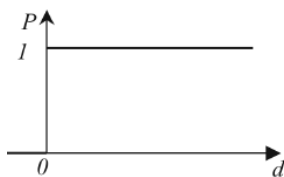
$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (2.7)$$

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1 \quad (2.8)$$

$$P_j(a, b) = 0, \text{ όταν } g_j(a) - g_j(b) \leq 0 \quad (2.9)$$

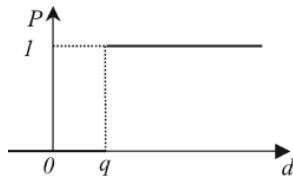
Όταν $g_j(a) - g_j(b) > 0$, η συνάρτηση P_j παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα με την επιλογή του αναλυτή από τις παρακάτω καμπύλες. Οι παράμετροι που θα χρειαστεί ενδεχομένως να προσδιοριστούν είναι το κατώφλι αδιαφορίας q , το κατώφλι προτίμησης p και το ενδιάμεσο κατώφλι s (μεταξύ q και p).

- Κοινό κριτήριο (Usual)



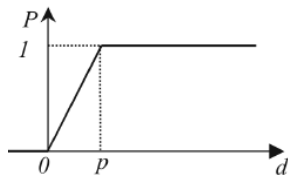
$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$$

- Κριτήριο U-καμπύλης



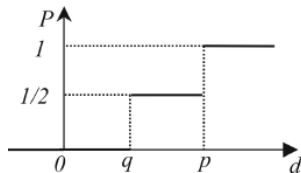
$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$$

- Κριτήριο V-καμπύλης (V-shape)



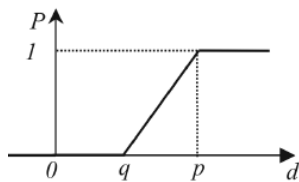
$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$$

- Κριτήριο επιπέδων (Level)



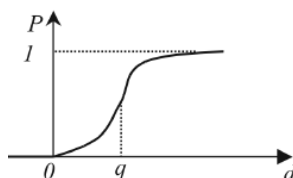
$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$$

- Κριτήριο V-καμπύλης με κατώφλι αδιαφορίας (Linear)



$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$$

- Κριτήριο Gauss



$$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$$

Πολυκριτήριος δείκτης προτίμησης

Για κάθε ζεύγος δράσεων (a,b) , ορίζεται ο ακόλουθος σταθμισμένος δείκτης προτίμησης, ο οποίος εκφράζει τον βαθμό ολικής προτίμησης της δράσης a έναντι της b :

$$\pi(\alpha, \beta) = \sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b)$$

(2.10)

Ροές υπεροχής

Για κάθε δράση a υπολογίζονται τώρα οι εξής δείκτες (υπεροχής):

- **Θετική ροή υπεροχής** (positive outranking flow)

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (2.11)$$

- **Αρνητική ροή υπεροχής** (negative outranking flow)

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (2.12)$$

- **Καθαρή ροή υπεροχής** (net outranking flow)

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad (2.13)$$

Στη μέθοδο PROMETHEE I, οι δράσεις οδηγούνται σε μερική κατάταξη μέσω της θετικής και αρνητικής ροής υπεροχής, ενώ η μέθοδος PROMETHEE II οδηγεί σε πλήρη κατάταξη μέσω της καθαρής ροής υπεροχής φ .

Μια βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE II, είναι ο καθορισμός των βαρών w των κριτηρίων.

2.1.2 Προσδιορισμός Βαρών

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι προσδιορισμού βαρών (απλές και σύνθετες). Για την εφαρμογή της PROMETHEE II, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Rank Order Centroid (ROC) (Barron and Barrett 1996).

Η μέθοδος Rank Order Centroid, είναι ένας απλός τρόπος προσδιορισμού βαρών ανάλογα με την σημαντικότητά των κριτηρίων. Συνήθως ο αποφασίζων, μπορεί πιο εύκολα να κατατάσσει κριτήρια ως προς την σημαντικότητα τους, παρά να αποδίδει κάποια τιμή ο ίδιος στα βάρη των κριτηρίων. Οπότε βάσει της κατάταξης των κριτηρίων, αποδίδεται σε ποσοστό η βαρύτητα της υποκειμενικής άποψης τους αποφασίζοντας. Ο υπολογισμός των βαρών βασίζεται στη παρακάτω φόρμουλα:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{j}, i = 1, \dots, n \quad (2.14)$$

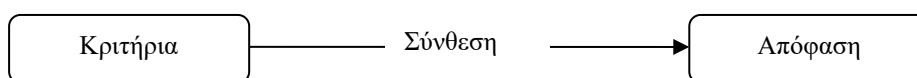
Όπου:

n : το πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης και

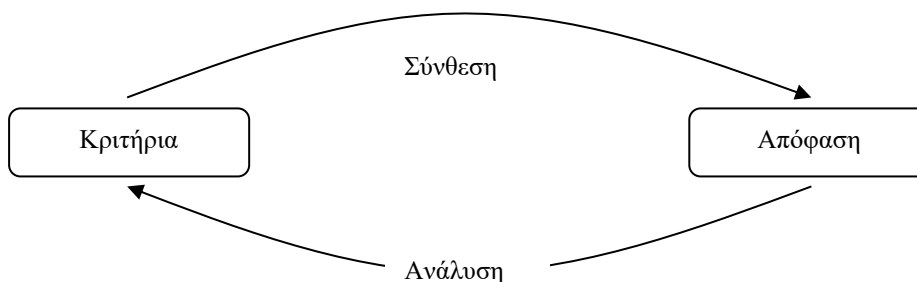
i : θέση κριτηρίου στην κατάταξη

2.2. Αναλυτικό - Συνθετικό μοντέλο

Τα μοντέλα της πολυκριτήριας ανάλυσης, στην μεγαλύτερη πλειοψηφία τους, απεικονίζουν μια παραδοσιακή αντίληψη του ορθολογισμού που βασίζεται στις αρχές της γραμμικότητας και της αιτιότητας, δηλαδή στη λογική ότι η απόφαση καθορίζεται από τα κριτήρια (συνθετική προσέγγιση, aggregation approach). Η αναλυτική-συνθετική προσέγγιση (aggregation-disaggregation approach), από τη δική της πλευρά, δέχεται ότι η απόφαση και τα κριτήρια επιδέχονται προοδευτική επεξεργασία αλληλοδομούμενα μέσα στο χρόνο, όπως φαίνεται στα σχήματα 2.1 και 2.2.



Σχήμα 2.1 Παραδοσιακή προσέγγιση προβλημάτων απόφασης



Σχήμα 2.2: Αναλυτική – Συνθετική προσέγγιση προβλημάτων απόφασης

Η αναλυτική-συνθετική προσέγγιση εστιάζεται στην συσχέτιση των πραγματικών δεδομένων απόφασης και του μοντέλου απόφασης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή συμβατότητα μοντέλου-αποφασίζοντος. Ουσιαστικά, οι μέθοδοι της συγκεκριμένης προσέγγισης προσδιορίζουν τις παραμέτρους εκείνες του μοντέλου απόφασης οι οποίες επιτρέπουν την βέλτιστη ανασύσταση μιας απόφασης. Μπορεί, συνεπώς, να γίνει μια αντιστοιχία με το στατιστικό παράδειγμα της επαγωγής (inference paradigm).

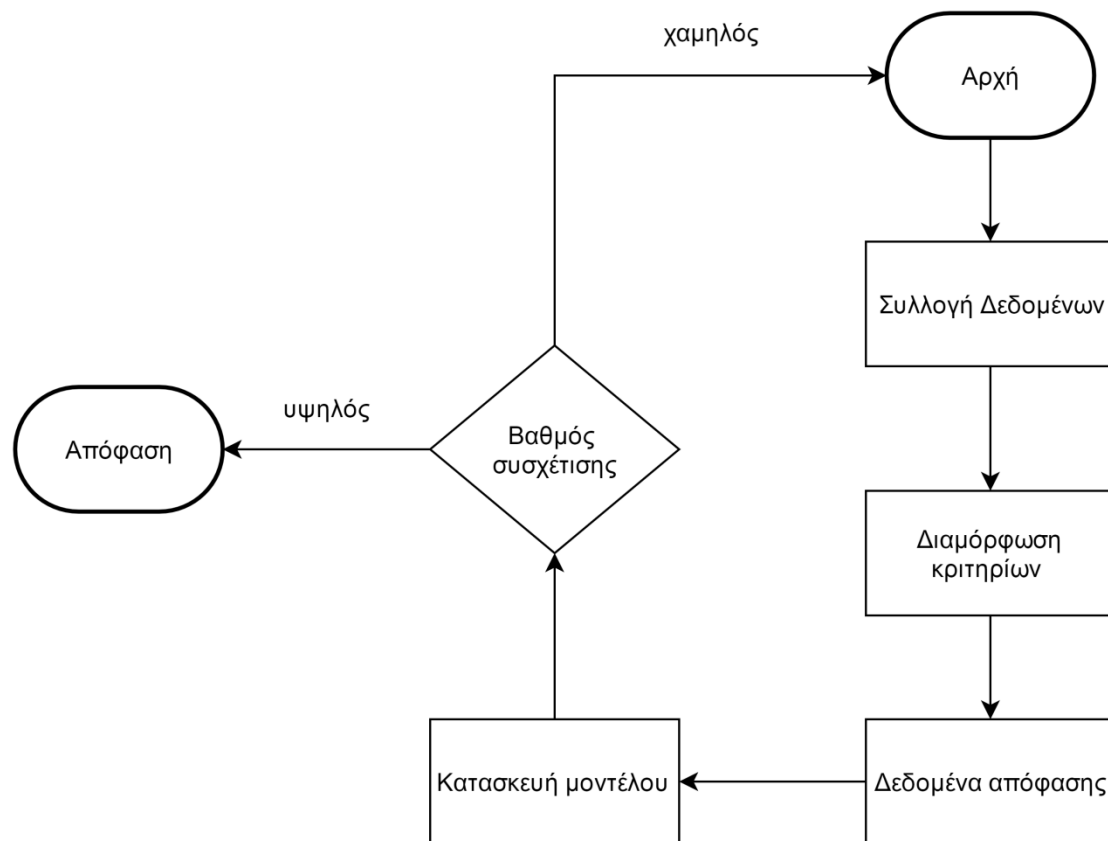
Η φιλοσοφία αυτή προϋποθέτει ότι τα αποτελέσματα μιας απόφασης μπορεί, είτε να παρατηρηθεί (σε περιπτώσεις αποφάσεων με επαναληπτικό χαρακτήρα), είτε να εξωτερικευτεί από τον αποφασίζοντα μέσα από διαλογικές διαδικασίες. Βέβαια, όταν προσδιοριστεί το μοντέλο απόφασης, ο απώτερος σκοπός είναι η επέκτασή του (extrapolation) στο υπό μελέτη σύνολο A των δράσεων του προβλήματος.

Η αρχή της αναλυτικής-συνθετικής προσέγγισης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3, όπου πρέπει να σημειωθεί ότι, σε περίπτωση που διαπιστωθεί ασυνέπεια ανάμεσα στον αποφασίζοντα και το εκτιμώμενο μοντέλο απόφασης, αναθεωρείται είτε η ασυνεπής οικογένεια κριτηρίων είτε η αξιοπιστία των δεδομένων της απόφασης.

Δράσεις Αναφοράς

Για την αποσαφήνιση της ολικής προτίμησης ενός αποφασίζοντος, οι Jacquet-Lagrèze & Siskos τονίζουν την αναγκαιότητα ύπαρξης ενός συνόλου δράσεων αναφοράς A_R (reference actions), το οποίο μπορεί να είναι:

- Ένα σύνολο προγενέστερων δράσεων
- Ένα υποσύνολο των πραγματικών δράσεων του προβλήματος, ιδιαίτερα όταν το A είναι αρκετά μεγάλο ($A_R \subset A$)
- Ένα σύνολο εικονικών δράσεων, το οποίο μπορεί να αξιολογηθεί με ευκολία από τον αποφασίζοντα, ώστε αυτός να εκφράσει τις ολικές του προτιμήσεις.



Σχήμα 2.3: Αρχή της αναλυτικής συνθετικής προσέγγισης

2.2.1 Προσθετικό μοντέλο

Θεωρώντας ότι τα κριτήρια είναι βάσει προτίμησης ανεξάρτητα μεταξύ τους και χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη την αβεβαιότητα στο μοντέλο πολυκριτήριας ανάλυσης, μπορούμε να εφαρμόσουμε το απλό γραμμικό προσθετικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό βοηθάει στην παρουσίαση των τιμών μίας επιλογής στα διάφορα κριτήρια σε μία συνολική τιμή. Αυτό γίνεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή για κάθε κριτήριο με το βάρος αυτού του κριτηρίου και στη συνέχεια προσθέτοντας όλες αυτές τις σταθμισμένες τιμές μαζί. Φαίνεται, λοιπόν, πως η χρήση

του προσθετικού μοντέλου είναι δυνατή μόνο σε περιπτώσεις που τα κριτήρια είναι αμιγώς ανεξάρτητα με βάση την προτίμηση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το γραμμικό προσθετικό μοντέλο περιγράφεται από το εξής μαθηματικό πλαίσιο:

$$u(g) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(g_i)$$

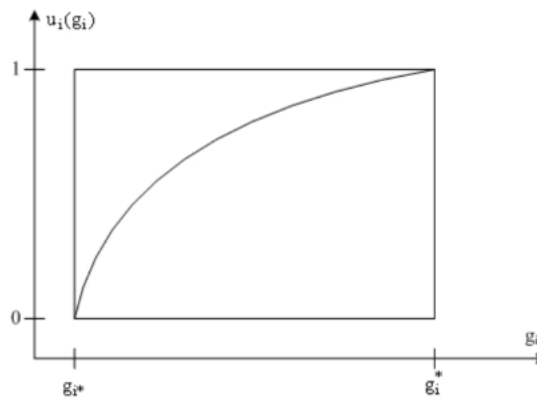
$$u_i(g_{i^*}) = 0, u_i(g_i^*) = 1, 0 \leq u_i(g_i) \leq 1 \forall i=1,2,\dots,n \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

$$w_i \geq 0, \forall i=1,2,\dots,n \quad (2.16)$$

Όπου:

- $g_i=(g_1,g_2,\dots,g_n)$ είναι η τιμή μιας επιλογής στο n -οστό κριτήριο και g_i^*,g_i^* είναι η μέγιστη και ελάχιστη προτιμώμενη τιμή για το συγκεκριμένο κριτήριο.
- $u_i(g_i), i=1,2,\dots,n$ είναι οι μη αυξανόμενες περιθώριες συναρτήσεις αξίας των επιλογών $g_i, i=1,2,\dots,n$
- w_i είναι το σχετικό βάρος της i -οστής περιθώριας συνάρτησης $u_i(g_i)$



Σχημα 2.4: Περιθώρια συνάρτηση αξίας

Αμφότερες οι περιθώριες και η γενική συνάρτηση αξίας παρουσιάζουν την ιδιότητα της μονοτονίας του κριτηρίου. Συνεπώς, στην περίπτωση της γενικής συνάρτησης αξίας, για δύο δοσμένες επιλογές a και b ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

$$u[g(a)] > u[g(b)] \Leftrightarrow a > b \text{ (Προτίμηση)}$$

$$u[g(a)] = u[g(b)] \Leftrightarrow a \sim b \text{ (Αδιαφορία)}$$

$$(2.17)$$

Η δημοτικότητα του προσθετικού μοντέλου έγκειται στην ικανότητά του να αξιολογεί ποσοτικά μεγάλα σύνολα εναλλακτικών και να μεταφράζει εύκολα τα αποτελέσματα και ιδιαίτερα τις διαφορές ανάμεσα στις τιμές που έλαβαν οι εναλλακτικές. Οι περιορισμοί του μοντέλου βρίσκονται στην επαλήθευση των υποκείμενων παραδοχών.

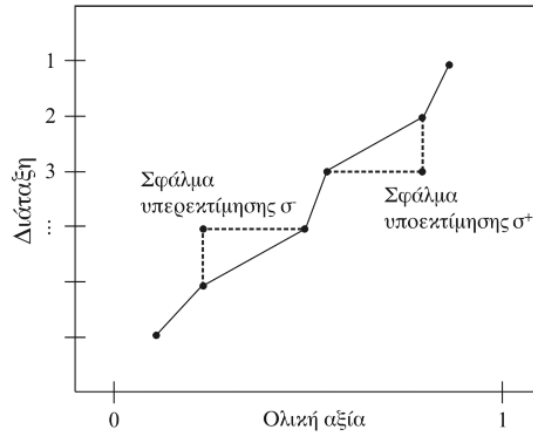
Συγκεκριμένα, η αναγκαία συνθήκη για την επικύρωση ενός προσθετικού μοντέλου για τον αποφασίζοντα είναι η προτιμησιακή ανεξαρτησία όλων των κριτηρίων. Ένα ζεύγος κριτηρίων (g_i, g_j) είναι προτιμησιακά ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα κριτήρια όταν οι συσχετισμοί (trade-offs) μεταξύ των κριτηρίων g_i, g_j δεν εξαρτώνται από τις τιμές των υπόλοιπων κριτηρίων. Το σύνολο των κριτηρίων υποτίθεται προτιμησιακά ανεξάρτητο όταν η ίδια συνθήκη ισχύει για όλα τα ζεύγη κριτηρίων. Όταν οι συναρτήσεις U_i , του μαθηματικού μοντέλου που αναφέρθηκε παραπάνω, είναι ήδη αξιολογημένες, το γραμμικό αυτό μοντέλο ισχύει αν και μόνο αν οι ενδοκριτηριακές παράμετροι (βάρη) p_i είναι σταθερές τιμές υποκατάστασης (trade-offs) μεταξύ των U_i . Στην περίπτωση της λήψης αποφάσεων υπό καθεστώς αβεβαιότητας, η συνάρτηση χρησιμότητας του αποφασίζοντα μπορεί να είναι είτε προσθετική είτε πολλαπλασιαστική συνάρτηση των μέσων περιθώριων χρησιμότητων, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η στάση του αποφασίζοντα έναντι στον κίνδυνο. Σε περίπτωση βεβαιότητας, ένα πολλαπλασιαστικό μοντέλο μπορεί να μετατραπεί σε προσθετικό έπειτα από επεξεργασία (απαγωγή).

2.2.2 Μέθοδοι UTA-UTASTAR

Η μέθοδος UTA (UTilités Additives) η οποία προτάθηκε από τους Jacquet-Lagrange & Siskos (1982) έχει ως στόχο την εκτίμηση (επαγωγή) μιας ή περισσότερων προσθετικών συναρτήσεων αξίας από μία προδιάταξη (διάταξη με ισοδυναμίες) ενός συνόλου αναφοράς A_R . Η μέθοδος χρησιμοποιεί ειδικές τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού για να καθορίσει τις συγκεκριμένες συναρτήσεις, έτσι ώστε η(οι) κατάταξη(εις) που αποκτάται(ώνται) μέσω αυτών των συναρτήσεων στο A_R να είναι όσο το δυνατόν πιο συμβατή(ές) με την αρχική προδιάταξη. Η οικογένεια μεθόδων UTA αποτελεί βασικό κομμάτι των αναλυτικού τρόπου προσέγγισης προβλημάτων και αυτός είναι ο λόγος που συναντάμε διάφορες παραλλαγές και διαφοροποιήσεις (UTA 2, UTASTAR) των μεθόδων αυτών.

Το μοντέλο σύνθεσης των κριτηρίων (μοντέλο απόφασης) στη μέθοδο UTA είναι μία προσθετική συνάρτηση αξίας της μορφής (2.15), (2.16).

Στην αρχική έκδοση της μεθόδου UTA, για κάθε δράση a ορίζεται ένα μοναδικό σφάλμα $\sigma(a)$. Αυτή η συνάρτηση σφάλματος δεν είναι επαρκής για την ελαχιστοποίηση της ολικής διασποράς των σημείων στη μονότονη καμπύλη του σχήματος 2.4 .



Σχήμα 2.4: Σφάλματα υποεκτίμησης και υπερεκτίμησης

Το πρόβλημα αφορά τα σημεία που βρίσκονται δεξιά της καμπύλης, από τα οποία θα ήταν προτιμότερο να αφαιρεθεί μια ποσότητα αξίας χωρίς να αυξηθούν οι αξίες των άλλων (παράδειγμα της ποιοτικής ή μονότονης παλινδρόμησης, ordinal regression paradigm). Στην μέθοδο UTASTAR, η οποία προτάθηκε από τους *Siskos & Yannacopoulos (1985)* και αποτελεί μία βελτιωμένη έκδοση της πρωτότυπης μεθόδου UTA, εισάγεται μία διπλή θετική συνάρτηση σφάλματος και χρησιμοποιώντας το προσθετικό μοντέλο (2.15), (2.16) και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις προτίμησης (2.17), η αξία κάθε εναλλακτικής $a \in A_R$ μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$u'[g(a)] = \sum_{i=1}^n u_i [g_i(a)] - \sigma^+(a) + \sigma^-(a), \quad \forall a \in A_R \quad (2.18)$$

Όπου σ^+ και σ^- είναι τα σφάλματα υποεκτίμησης και υπερεκτίμησης, αντίστοιχα.

Για την εκτίμηση των αντίστοιχων περιθωρίων συναρτήσεων αξίας σε μια γραμμική κατά τμήματα μορφή, προτείνεται η χρήση της γραμμικής παρεμβολής. Έτσι, για κάθε κριτήριο, το διάστημα $[g_i^*, g_i^{**}]$ χωρίζεται σε $(\alpha_i - 1)$ ίσα διαστήματα και τα τελικά σημεία g_i^j δίνονται από την σχέση:

$$g_i^j = g_i^* + \frac{j-1}{\alpha_i-1} (g_i^{**} - g_i^*), \quad \forall j = 1, 2, \dots, \alpha_i \quad (2.19)$$

Η περιθώρια αξία μιας εναλλακτικής a υπολογίζεται με χρήση γραμμικής παρεμβολής:

$$u_i[g_i(a)] = u_i(g_i^j) + \frac{g_i(a) - g_i^j}{g_i^{j+1} - g_i^j} [u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j)],$$

$$\text{για } g_i(a) \in [g_i^j, g_i^{j+1}] \quad (2.20)$$

Το σύνολο αναφοράς $A_R = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ «ανακατατάσσεται» με τέτοιο τρόπο, ώστε οι δράσεις να είναι διατεταγμένες σε μια σειρά προτίμησης, δηλαδή η a_1 αποτελεί την κεφαλή και η a_m την ουρά της κατάταξης. Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη κατάταξη έχει τις μορφές μιας

προδιάταξης R , για κάθε ζεύγος διαδοχικών δράσεων (a_k, a_{k+1}) ισχύει, είτε $a_k > a_{k+1}$ (προτίμηση), είτε $a_k = a_{k+1}$ (αδιαφορία). Έτσι αν τεθεί

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = u'[g(a_k)] - u'[g(a_{k+1})] \quad (2.21)$$

Τότε ισχύει μία από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

$$\begin{cases} \Delta(a_k, a_{k+1}) \geq \delta \text{ αν } a_k > a_{k+1} \\ \Delta(a_k, a_{k+1}) = 0 \text{ αν } a_k \sim a_{k+1} \end{cases} \quad (2.22)$$

Όπου δ είναι ένας μικρός θετικός αριθμός που διαχωρίζει σημαντικά δύο διαδοχικές κλάσεις ισοδυναμίας της R .

Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση σχετικά με την μονοτονία των προτιμήσεων, οι περιθώριες αξίες $u_i(g_i)$ πρέπει να ικανοποιούν το σύνολο των ακόλουθων περιορισμών:

$$u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \geq s_i, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.23)$$

Όπου $s_i \geq 0$ είναι τα κατώφλια αδιαφορίας που ορίζονται για κάθε κριτήριο g_i . Τα συγκεκριμένα κατώφλια δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου UTA, αλλά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την αποφυγή φαινομένων, όπου $u_i(g_i^{j+1}) = u_i(g_i^j)$ όταν $g_i^{j+1} > g_i^j$.

Στην περίπτωση της UTASTAR, υπάρχει τροποποίηση στην μοντελοποίηση των περιορισμών μονοτονίας των κριτηρίων οι οποίοι μετασχηματίζονται με τη βοήθεια των ακόλουθων μεταβλητών:

$$w_{ij} = u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j), \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \text{ και } j = 1, 2, \dots, \alpha_i - 1 \quad (2.24)$$

Με αυτόν τον τρόπο, οι συνθήκες μονοτονίας μπορούν να αντικατασταθούν από περιορισμούς μη αρνητικότητας των μεταβλητών w_{ij} .

Συνεπώς, ο αλγόριθμος της UTASTAR συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Η ολική αξία των δράσεων $u[g(a_k)]$, $k=1, 2, \dots, m$ εκφράζεται αρχικά ως συνάρτηση των περιθώριων αξιών $u_i(g_i)$ και στη συνέχεια των μεταβλητών w_{ij} σύμφωνα με την εξίσωση, μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$\begin{cases} u_i(g_i^1) = u_i(g_i^*) = 0, \forall i = 1, 2, \dots, n \\ u_i(g_i^j) = \sum_{t=1}^{j-1} w_{it}, \forall i = 1, 2, \dots, n \text{ και } j = 2, 3, \dots, \alpha_i - 1 \end{cases} \quad (2.25)$$

Βήμα 2: Εισάγονται δύο συναρτήσεις σφάλματος σ^+ και σ^- στο A_R , γράφοντας για κάθε ζεύγος διαδοχικών δράσεων στην προδιάταξη τις αναλυτικές εκφράσεις:

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = u[g(a_k)] - \sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k) - u[g(a_{k+1})] + \sigma^+(a_{k+1}) - \sigma^-(a_{k+1}) \quad (2.26)$$

Βήμα 3: Οι περιθώριες συναρτήσεις αξίας υπολογίζονται μέσω του ακόλουθου γραμμικού προγράμματος (γ.π.) που ως αντικειμενική συνάρτηση παρουσιάζεται το σύνολο των προκαλούμενων σφαλμάτων:

$$\begin{cases} [min]z = \sum_{k=1}^m [\sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k)] \\ \text{υπό τους περιορισμούς} \\ \left. \begin{aligned} \Delta(a_k, a_{k+1}) \geq \delta \text{ if } a_k \neq a_{k+1} \\ \Delta(a_k, a_{k+1}) = 0 \text{ if } a_k = a_{k+1} \end{aligned} \right\} \forall k = 1, 2, \dots, m-1 \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\alpha_i-1} w_{ij} = 1 \\ w_{ij} \geq 0, \sigma^+(a_k) \geq 0, \forall i, j \text{ and } k \end{cases} \quad (2.27)$$

Βήμα 4: Ελέγχεται η ύπαρξη πολλαπλών βέλτιστων ή ημιβέλτιστων λύσεων στο γραμμικό πρόγραμμα, υπολογίζοντας το βαρύκεντρο των προσθετικών συναρτήσεων αξίας που μεγιστοποιούν τις ακόλουθες αντικειμενικές συναρτήσεις:

$$u_i(g_i^*) = \sum_{j=1}^{\alpha_i-1} w_{ij}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2.28)$$

στο υπερπολύεδρο των περιορισμών του γραμμικού προγράμματος που περιορίζεται από τον επόμενο νέο περιορισμό:

$$\sum_{k=1}^m \sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k) \leq z^* + \varepsilon \quad (2.29)$$

Όπου z^* είναι η βέλτιστη τιμή (σφάλμα) του γραμμικού προγράμματος και ε είναι ένας πολύ μικρός θετικός αριθμός.

2.2.3 Ανάλυση ευστάθειας

Στα αναλυτικά συνθετικά μοντέλα, η κατασκευή του μοντέλου απόφασης δημιουργεί από μόνη της πρόβλημα ευστάθειας, αφού το μοντέλο αυτό δεν είναι μια και μοναδική συνάρτηση αξίας, αλλά ένας πολυεδρικός χώρος άπειρων τέτοιων συναρτήσεων λύσεων ενός γραμμικού προγράμματος.

Η μεθοδολογία ελέγχου της ευστάθειας βασίζεται σε μια διπολική διαδικασία που βασίζεται σε διαδοχικές μετρήσεις και εκτιμήσεις της ευστάθειας. Συγκεκριμένα, οι δύο πόλοι του αλγορίθμου, δηλαδή ο αναλυτικός και ο συνθετικός πόλος, αλληλεπιδρούν και παρέχουν ανατροφοδότηση ο ένας στον άλλο. Κατόπιν, προτείνεται ο Δείκτης Τυπικής Απόκλισης (ASI-Average Stability Index) για την αξιολόγηση της ευστάθειας.

Ο δείκτης τυπικής απόκλισης είναι ένα μέτρο ευρωστίας (robustness) και παρουσιάζει την μέση τιμή της κανονικοποιημένης τυπικής απόκλισης των εκτιμώμενων βαρών:

$$ASI = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{m \sum_{j=1}^m p_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^m p_{ij})^2}}{\frac{m}{n} \sqrt{n-1}} \quad (2.30)$$

όπου m είναι ο αριθμός των περιπτώσεων στάθμισης (weighting instances) του συστήματος, n είναι ο αριθμός των κριτηρίων και p_{ij} είναι το βάρος του i -οστού κριτηρίου για την j -οστή περίπτωση. Ο δείκτης ASI παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και συνήθως η ευρωστία των κριτηρίων θεωρείται ικανοποιητική όταν πετυχαίνεται σύγκλιση στην μέγιστη τιμή 1.



ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

3.1 Εξωτερικό και εσωτερικό ΣΑΠ

Η αντικεραυνική προστασία ενός ΦΒ συστήματος συνίσταται στην εγκατάσταση ενός εξωτερικού και ενός εσωτερικού ΣΑΠ. Το εξωτερικό ΣΑΠ αποτελείται από:

- τους συλλεκτήριους αγωγούς
- τους αγωγούς καθόδου
- το σύστημα γείωσης.

Σκοπός του εξωτερικού ΣΑΠ είναι η σύλληψη των κεραυνών και η διοχέτευση του κεραυνικού ρεύματος στη γη, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία της ΦΒ εγκατάστασης έναντι θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων, ενώ ταυτόχρονα να περιορίζονται οι επικίνδυνες για τον άνθρωπο υπερτάσεις.

Για το σχεδιασμό του συλλεκτηρίου συστήματος εφαρμόζονται οι παρακάτω μέθοδοι:

- μέθοδος της Γωνίας προστασίας
- μέθοδος της Κυλιόμενης σφαίρας
- μέθοδος του Πλέγματος.

Στις περισσότερες περιπτώσεις το εξωτερικό ΣΑΠ, είναι σε επαφή με την κατασκευή που χρήζει προστασίας. Όταν όμως, οι θερμικές επιπτώσεις στο σημείο του πλήγματος ή στους αγωγούς που διαρρέονται από ρεύμα κεραυνού, μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στην κατασκευή που χρήζει προστασίας ή στο περιεχόμενο της, τότε, συνιστάται να υπάρχει απόσταση μεταξύ των αγωγών του ΣΑΠ, και εύφλεκτων επιφανειών, εγκατάσταση δηλαδή απομονωμένου ΣΑΠ. Ένα απομονωμένο εξωτερικό ΣΑΠ αποτελείται από μία όπου

k_i συντελεστής εξαρτώμενος από τη στάθμη προστασίας

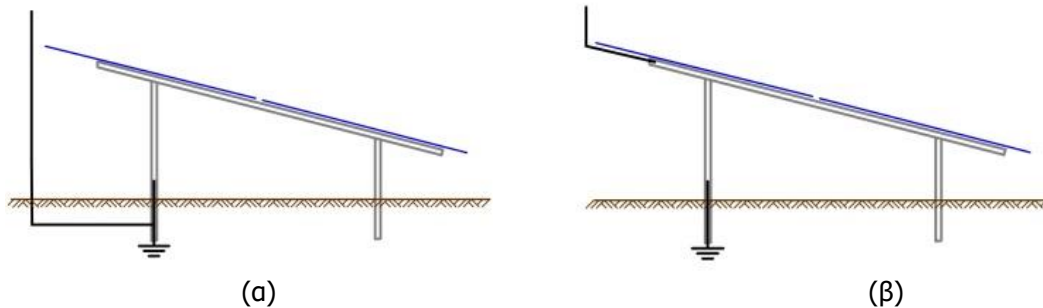
k_m συντελεστής εξαρτώμενος από τη μόνωση

k_c συντελεστής εξαρτώμενος από το κεραυνικό ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς γειωμένη ακίδα (ιστός), εγκατεστημένη σε απόσταση μεγαλύτερη από:

$$s = \frac{k_i}{k_m} \cdot k_c \cdot l$$

/ το μήκος του ιστού

(3.1)



Σχήμα 3.1 (α) απομονωμένο (β) μη απομονωμένο εξωτερικό ΣΑΠ

Το εσωτερικό ΣΑΠ περιλαμβάνει:

- ηλεκτρική απομόνωση αγωγίμων τμημάτων
- ισοδυναμικές συνδέσεις.

Οι παραπάνω διατάξεις προστασίας δεν εξασφαλίζουν πλήρως την προστασία του ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού του ΦΒ συστήματος έναντι αγόμενων και επαγόμενων υπερτάσεων. Για το λόγο αυτό, ο διαχωρισμός της εγκατάστασης σε Ζώνες Αντικεραυνικής Προστασίας (ΖΑΠ) και η λήψη επιπρόσθετων μέτρων προστασίας (μαγνητική θωράκιση, δρομολόγηση καλωδιώσεων) είναι απαραίτητη, προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του ΦΒ. Η μαγνητική θωράκιση μειώνει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και το μέγεθος των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων, ενώ η δρομολόγηση των καλωδιώσεων μειώνει τους σχηματιζόμενους βρόχους, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την εμφάνιση επαγόμενων υπερτάσεων. Να σημειωθεί ότι, ένα σημαντικό ζήτημα που σχετίζεται με την ποιότητα και το αδιάλειπτο της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος είναι το ζήτημα της βέλτιστης τεχνικής διαμόρφωσης της εγκατάστασης για τον περιορισμό των επαγωγικών υπερτάσεων στους βρόχους των στοιχειοσειρών της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης λόγω κεραυνικού πλήγματος. Οι επαγόμενες υπερτάσεις εξαρτώνται από την επιφάνεια των επαγόμενων βρόχων και τα χαρακτηριστικά του κεραυνικού ρεύματος, καθώς και τη θέση κεραυνοπληξίας.

Επιπρόσθετο μέτρο για τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων σε ένα ΦΒ είναι η εγκατάσταση απαγωγέων υπερτάσεων (Surge Protection Devices - SPDs). Οι απαγωγείς υπερτάσεων είναι μη γραμμικές αντιστάσεις, οι οποίες συνδέονται μεταξύ φάσης και γης και συμπεριφέρονται ως μονωτές κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος, ενώ παρουσιάζουν πολύ μικρή αντίσταση σε περίπτωση υπέρτασης, διοχετεύοντας το κεραυνικό ρεύμα προς τη γη.

Τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των απαγωγέων υπέρτασης είναι:

- Τάση συνεχούς λειτουργίας (U_c): είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη εναλλασσόμενη (rms)

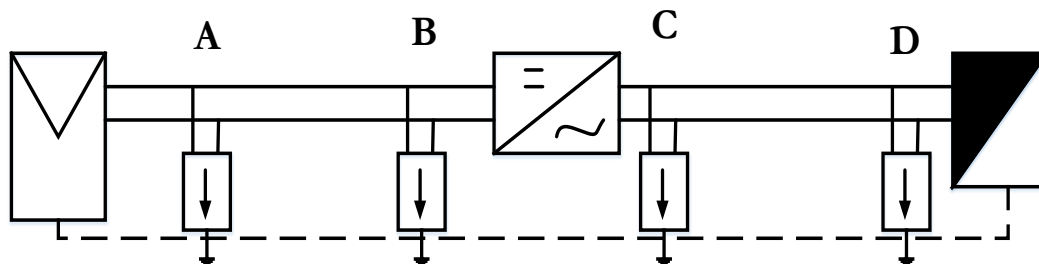
ή συνεχής, τάση που μπορεί να εφαρμόζεται διαρκώς στα άκρα του απαγωγέα.

- Ονομαστικό κρουστικό ρεύμα (I_n): είναι το μέγιστο κρουστικό ρεύμα 8/20μs το οποίο διαπερνά τον απαγωγέα.
- Παραμένουσα τάση (U_{res}): είναι η τάση στα άκρα του απαγωγέα κατά τη διέλευση ενός κρουστικού ρεύματος.
- Επίπεδο προστασίας (U_p): είναι η μέγιστη στιγμιαία τάση στα άκρα του απαγωγέα (παραμένουσα τάση) για συγκεκριμένο ρεύμα, η οποία καθορίζει την ικανότητα περιορισμού της εισερχόμενης υπέρτασης

Οι απαγωγείς υπερτάσεων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (κλάσεις):

- Κλάση I: προσφέρουν προστασία έναντι κεραυνικών ρευμάτων της μορφής 10/350μs. Τοποθετούνται συνήθως στην είσοδο της εγκατάστασης.
- Κλάση II: προσφέρουν προστασία έναντι κεραυνικών ρευμάτων της μορφής 8/20μs.
- Κλάση III: προσφέρουν προστασία σε ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα έναντι κεραυνικών ρευμάτων της μορφής 8/20μs και 10/350μs.

Σημαντικός παράγοντας για τον περιορισμό των υπερτάσεων σε επίπεδα που δε θα ξεπερνούν τη διηλεκτρική αντοχή του υπό προστασία εξοπλισμού είναι η τοποθέτηση των απαγωγέων σε καίριες θέσεις της εγκατάστασης. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται απλοποιημένο διάγραμμα ενός ΦΒ συστήματος, στο οποίο φαίνονται οι θέσεις εγκατάστασης των απαγωγέων υπέρτασης (A, B, C, D). Η εγκατάσταση των απαγωγέων στη θέση A δεν είναι υποχρεωτική στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των θέσεων A και B δεν ξεπερνά τα 10m. Το ίδιο ισχύει και την τοποθέτηση απαγωγέα στη θέση C, εάν η απόσταση μεταξύ των θέσεων C και D δεν ξεπερνά τα 10m. Η εγκατάσταση των απαγωγέων στις θέσεις B και D είναι σε κάθε περίπτωση αναγκαία.



Σχήμα 3.2 Εγκατάσταση απαγωγέων υπερτάσεων σε ΦΒ σύστημα

Όσον αφορά το σύστημα γείωσης, συνίσταται η επίτευξη χαμηλών τιμών αντίστασης γείωσης έτσι ώστε να περιοριστούν οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις. Προτείνονται δύο διατάξεις συστημάτων γείωσης: η τύπου A, η οποία περιλαμβάνει οριζόντια ή κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης, εξωτερικά της κατασκευής, συνδεδεμένα σε κάθε αγωγό καθόδου και η τύπου B, η οποία αποτελείται από ένα περιμετρικό ηλεκτρόδιο γείωσης, τοποθετημένο εξωτερικά της

κατασκευής, με το 80% του συνολικού μήκους του σε επαφή με το έδαφος ή από ένα ηλεκτρόδιο θεμελιακής γείωσης.

3.2 Μελέτη Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας

Ένα Σύστημα Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) δεν μπορεί να εμποδίσει το σχηματισμό κεραυνού. Γενικά ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος είναι πάντα ένας συμβιβασμός μεταξύ αποτελεσματικότητας και κόστους. Άρα, δεν εξασφαλίζει την απόλυτη προστασία της κατασκευής, ωστόσο μπορεί να μειώσει σε αποδεκτό βαθμό τις επιζήμιες επιπτώσεις του κεραυνού σε αυτή. Ο σχεδιασμός κάθε ΣΑΠ συνίσταται στην επιλογή της αποδεκτής στάθμης προστασίας. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας είναι οι διαστάσεις, η θέση και το υλικό της κατασκευής, η κατηγορία στην οποία αυτή κατατάσσεται σύμφωνα με τη χρήση της, οι συνέπειες που θα έχει η καταστροφή της στον άνθρωπο ή στο περιβάλλον καθώς και η κεραυνική δραστηριότητα στην περιοχή.

3.2.1 Αποτίμηση κινδύνου από κεραυνικό πλήγμα

Η εκτίμηση του κινδύνου ζημιάς από κεραυνούς σε μία κατασκευή έχει σκοπό να βοηθήσει τον μελετητή μηχανικό αντικεραυνικής προστασίας στην απόφαση του εάν συνιστάται ή όχι η προστασία της κατασκευής και εάν ναι, να επιλέξει τα κατάλληλα μέτρα προστασίας.

Οι ζημιές που προκαλούνται από τους κεραυνούς είναι διαφόρων μορφών:

- βλάβη ή απώλεια της ανθρώπινης ζωής
- ανεπιθύμητες απώλειες παροχών στο κοινό
- απώλεια αναντικατάστατης πολιτιστικής κληρονομιάς
- απώλειες μη συμπεριλαμβανομένων ανθρωπίνων, πολιτιστικών και κοινωνικών αξιών

- Αν ένας από τους τρεις πρώτους τύπους ζημιών εμφανιστεί σε μία κατασκευή, η απόφαση για τη λήψη ή όχι μέτρων προστασίας θα λαμβάνεται συγκρίνοντας την πραγματική τιμή της πιθανότητας ζημιάς της κατασκευής με την οριακή τιμή που καθορίζεται από τις Εθνικές Επιτροπές ή τις υπεύθυνες Αρχές.

Ανάλογα με τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη, η απόφαση για τη λήψη μέτρων προστασίας και την επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας λαμβάνεται μετά από ακριβή ανάλυση κινδύνου.

3.2.2 Συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή

Η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια περιοχή (N_d) εκφράζει τον μέσο αριθμό κεραυνών που μπορούν να πλήξουν άμεσα μια κατασκευή ανά έτος και υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot C_1 \cdot 10^{-6} \quad (3.2)$$

όπου:

- N_g είναι η μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος, εκφράζει δηλαδή τον αναμενόμενο μέσο αριθμό κεραυνικών πληγμάτων στο έδαφος ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο και έτος στην περιοχή εγκατάστασης της προς μελέτη κατασκευής,
- A_e είναι η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια της κατασκευής, σε τετραγωνικά μέτρα, που ορίζεται ως μια επίπεδη επιφάνεια εδάφους που έχει την ίδια μέση ετήσια συχνότητα πληγμάτων κεραυνού με την κατασκευή

και

- C_1 ο περιβαλλοντικός συντελεστής, ο καθορισμός του οποίου γίνεται ανάλογα της θέσης της κατασκευής και οι τιμές που παίρνει φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Σε σχέση με την θέση κατασκευής	C_1
Κατασκευή σε περιοχή που περιέχει κατασκευές ή δέντρα του ίδιου ύψους ή ψηλότερα	0,25
Κατασκευή περιτριγυρισμένη από χαμηλότερες κατασκευές	0,5
Απομονωμένη κατασκευή σε πεδιάδα και δεν υπάρχουν άλλες κατασκευές σε απόσταση 3H	1
Απομονωμένη κατασκευή που δεσπόζει ή πάνω σε κορυφή λόφου ή κάποιας εξοχής σε πεδιάδα	2

Πίνακας 3.1 Τιμές περιβαλλοντικού συντελεστή σε σχέση με την θέση κατασκευής

Μέση ετήσια πυκνότητα πλήγματος κεραυνού στο έδαφος

Η μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος (N_g) δίνεται από ειδικούς χάρτες που δείχνουν την μέση συχνότητα πτώσεως κεραυνού ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. Σύμφωνα με την IEC, εάν η τιμή της δεν είναι διαθέσιμη μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά από την κάτωθι εξίσωση:

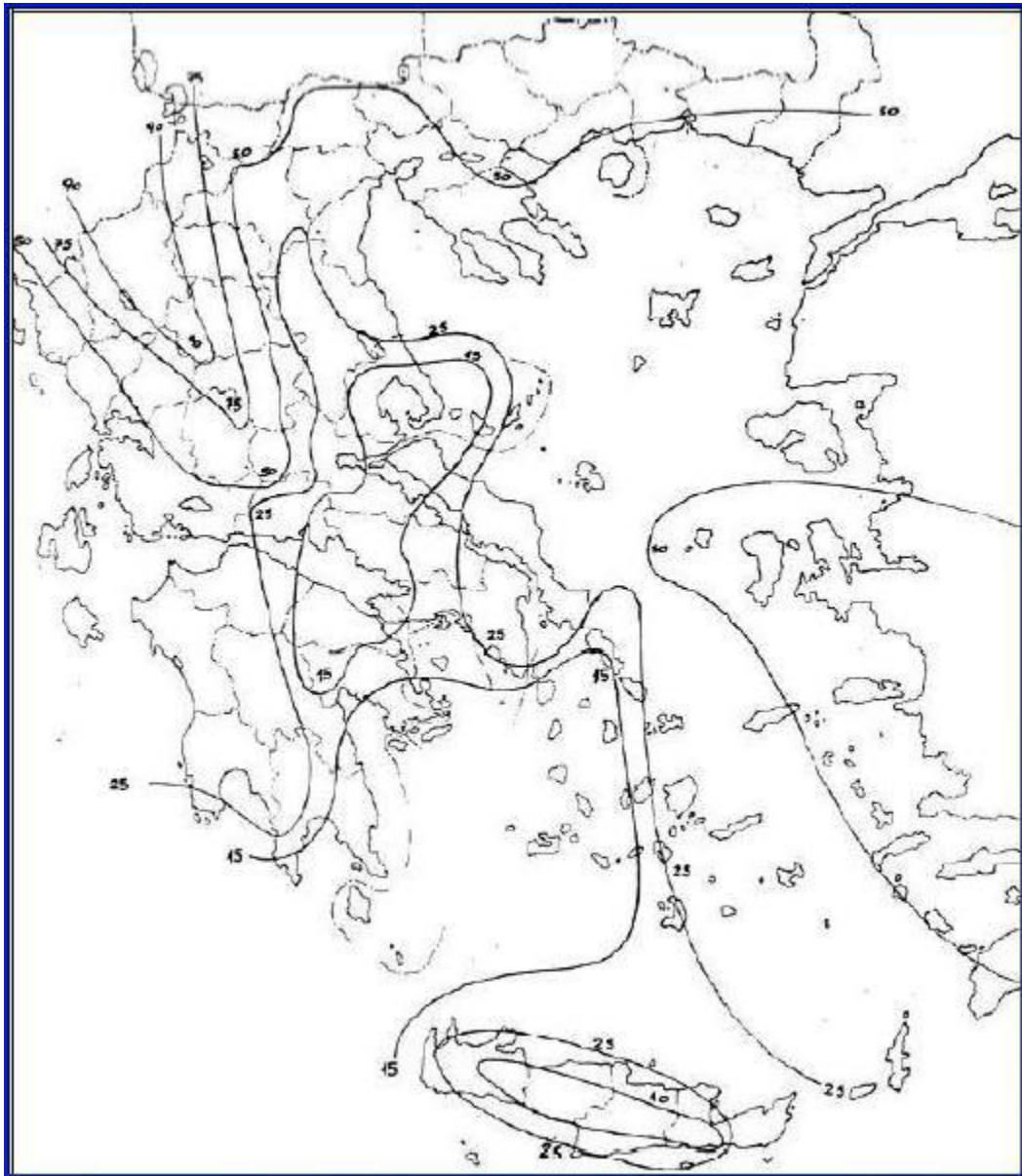
$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (3.3)$$

Το αποτέλεσμα της εξίσωσης δίνει το πλήθος των πληγμάτων κεραυνού ανά km^2 . Ο όρος T_d συμβολίζει τον αριθμό ημερών καταιγίδας ανά έτος και δίνεται από χάρτες ισοκεραυνικών καμπυλών που πολλές χώρες έχουν συντάξει για τον σκοπό αυτό. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ο χάρτης ισοκεραυνικών καμπυλών της Ελλάδας.

Ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια

Η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια μίας κατασκευής ορίζεται ως μία επίπεδη επιφάνεια εδάφους που έχει την ίδια ετήσια συχνότητα άμεσων πληγμάτων όπως η κατασκευή. Για απομονωμένες κατασκευές η επιφάνεια αυτή (A_e) είναι η επιφάνεια που περικλείεται μέσα στο περίγραμμα που προκύπτει από την τομή της επιφάνειας του εδάφους και μίας ευθείας γραμμής

με κλίση 1/3 η οποία διέρχεται από τα ψηλότερα τμήματα της κατασκευής (εφαπτομένη στην κατασκευή) και περιστρεφόμενη γύρω από αυτή όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.

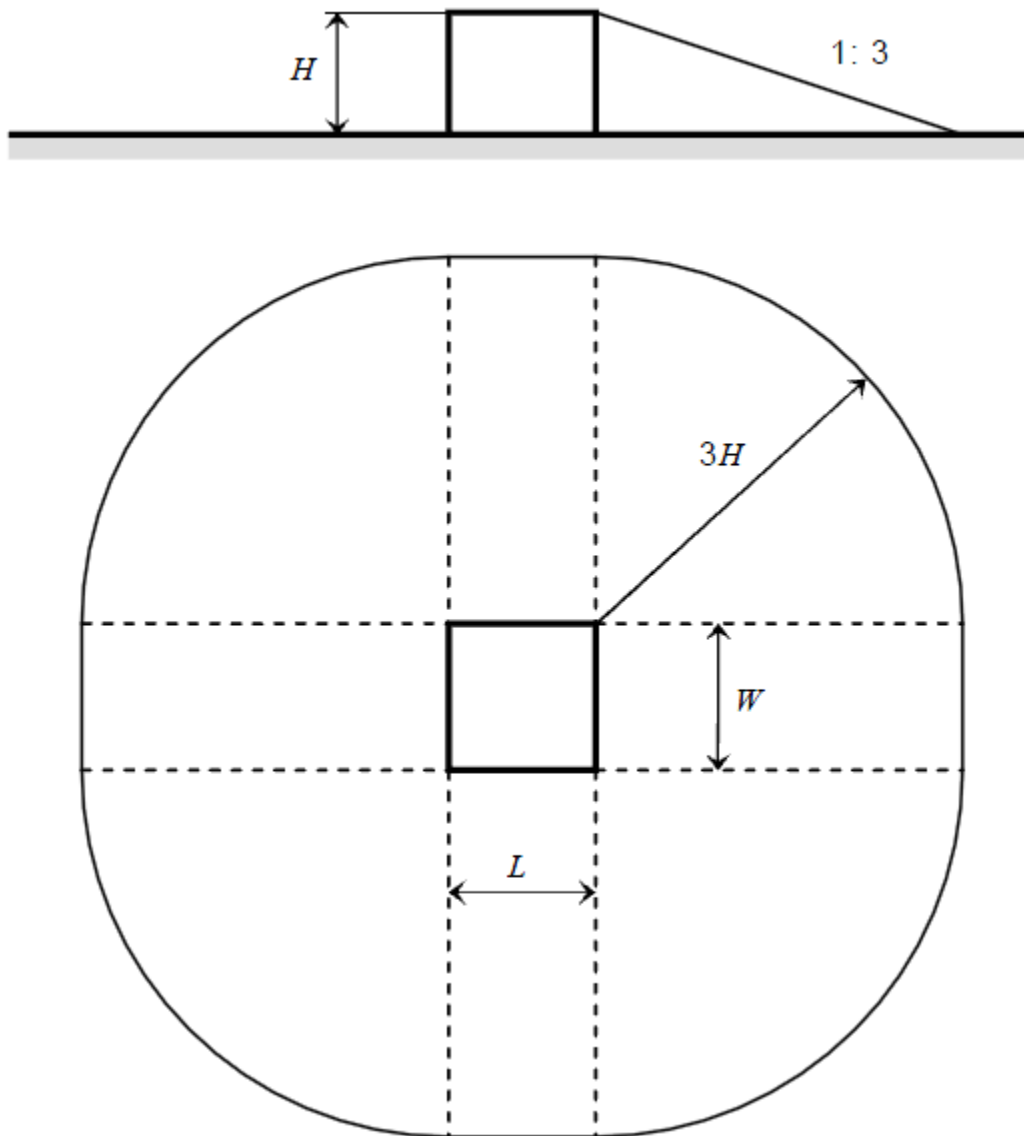


Σχήμα 3.3 Χάρτης ισοκεραυνικών καμπυλών της Ελλάδας

Εφόσον λοιπόν πρόκειται για συνδυασμό ορθογωνίων κατασκευών, η ισοδύναμη επιφάνεια υπολογίζεται ως εξής:

$$A_e = L \cdot W + 6H(L + W) + 9\pi H^2 \quad (3.4)$$

όπου L το μήκος, W το πλάτος και H το ύψος της κατασκευής.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα κατασκευής της ισοδύναμης επιφάνειας

Αποδεκτή συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων

Η αποδεκτή συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων μιας κατασκευής, N_c , εκφράζει τη μέγιστη αποδεκτή τιμή του αριθμού των κεραυνών που μπορούν να πλήξουν άμεσα την κατασκευή ανά έτος και μπορούν να προκαλέσουν ζημιά. Η τιμή της μπορεί να εκτιμηθεί μέσω μελέτης αποτίμησης κινδύνου από πλήγμα κεραυνού λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλους συντελεστές όπως:

- τύπος δόμησης
- παρουσία εύφλεκτων υλικών και εκρηκτικών ουσιών
- ληφθέντα μέτρα για μείωση των επιπτώσεων του πλήγματος
- πλήθος ανθρώπων που επηρεάζονται από την καταστροφή
- τύπος και σπουδαιότητα υπηρεσιών εξυπηρέτησης του κοινού που επηρεάζονται
- αξία αγαθών που ενδεχομένως καταστραφούν κ.α.

Κάποια παραδείγματα των συντελεστών αυτών, έχουν τυποποιηθεί και φαίνονται σε πίνακες του προτύπου ΕΛΟΤ 1197.

Σε μερικές περιπτώσεις οι τιμές του N_c επιβάλλονται από τοπικούς κανονισμούς.

3.2.3 Διαδικασία επιλογής του ΣΑΠ

Η αποδεκτή συχνότητα ζημιών από κεραυνικά πλήγματα σε μία κατασκευή (N_c) πρέπει να συγκρίνεται με την αναμενόμενη συχνότητα πληγμάτων από κεραυνό, N_d .

- Εάν $N_d \leq N_c$ η κατασκευή δεν χρειάζεται προστασία.

- Εάν $N_d < N_c$ τότε πρέπει να εγκατασταθεί ΣΑΠ με αποτελεσματικότητα:

$$E \geq 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (3.5)$$

και να επιλεγεί η κατάλληλη στάθμη προστασίας.

Μετά τον υπολογισμό του E , η στάθμη προστασίας προκύπτει ως εξής:

$E > 0,98$	Στάθμη I +επιπλέον προστατευτικά μέτρα
$0,95 < E \leq 0,98$	Στάθμη I
$0,90 < E \leq 0,95$	Στάθμη II
$0,80 < E \leq 0,90$	$0,80 < E \leq 0,90$
$0 < E \leq 0,80$	Στάθμη IV
$E \leq 0$	Δεν χρειάζεται προστασία

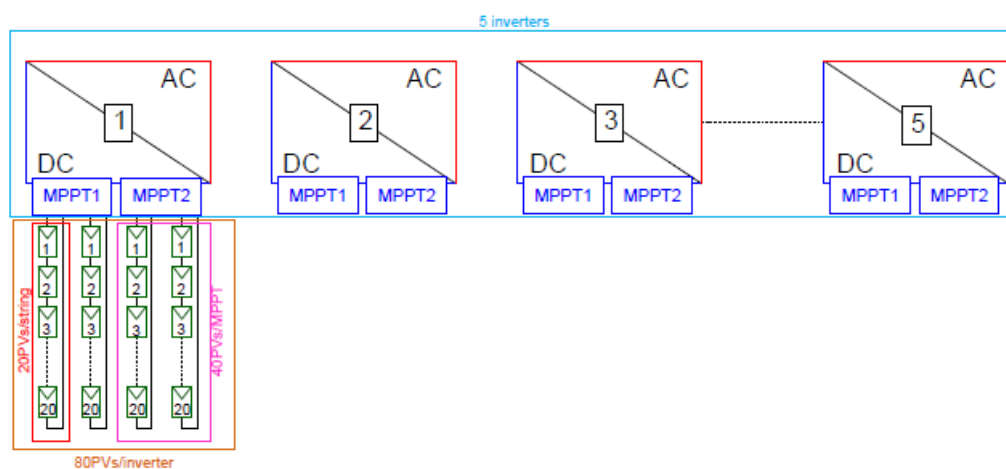
Πίνακας 3.2 Στάθμη προστασίας του ΣΑΠ που αντιστοιχεί στην αποτελεσματικότητα E



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

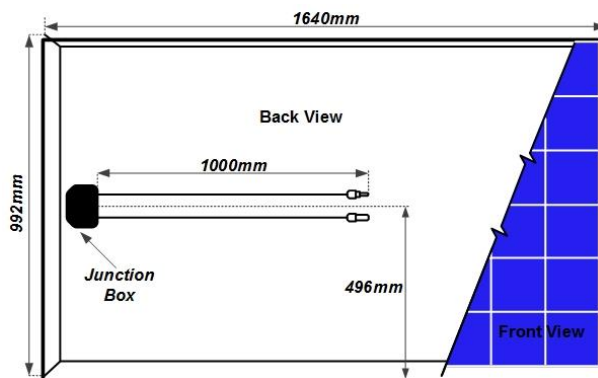
4.1 Περιγραφή συστήματος

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται μια ΦΒ εγκατάσταση ισχύος 100kWp, αποτελούμενη από πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου ισχύος 250Wp και πέντε αντιστροφείς των 20kW. Σε κάθε αντιστροφή συνδέονται 80 πλαίσια, δηλαδή τέσσερις συστοιχίες που αποτελούνται από 20 πλαίσια. Οι συστοιχίες ανά δύο συνδέονται παράλληλα σε έναν ελεγκτή MPPT (Maximum Power Point Tracking). Το Σχήμα 4.1 παρουσιάζει το διάγραμμα της ως άνω διάταξης.



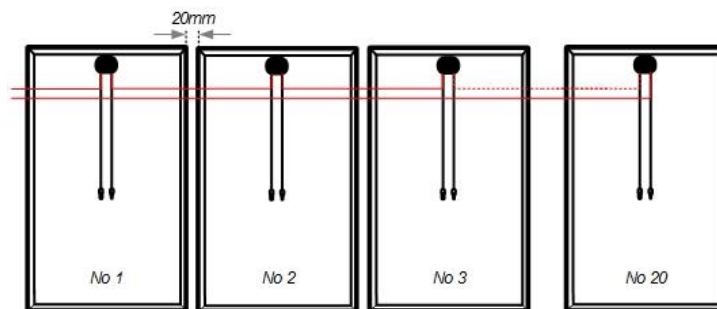
Σχήμα 4.1 Τοπολογία του υπό εξέταση συστήματος

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κάθε πλαισίου. Λαμβάνοντας υπόψιν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός τυπικού πολυκρυσταλλικού πλαισίου, η ονομαστική τάση λειτουργίας κάθε συστοιχίας είναι 620V σε STC (Standard Test Conditions), ενώ η μέγιστη τάση δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 850V (για κρύα πρωινά με θερμοκρασία περιβάλλοντος -10°C). Η μέγιστη τάση κάθε συστοιχίας εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και μετράται σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος (όταν τα Φ/Β δεν παράγουν ισχύ). Επίσης, το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας είναι 8,25A ενώ το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης 8,9A.



Σχήμα 4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ΦΒ πλαισίου

Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει τον τρόπο συνδεσμολογίας κάθε συστοιχίας ΦΒ πλαισίων. Ο εφαρμοζόμενος τρόπος σύνδεσης περιορίζει την επιφάνεια των σχηματιζόμενων βρόχων (περίπου 2m^2), απαιτεί ωστόσο μεγάλο μήκος καλωδίου DC. Συγκεκριμένα, κάθε αντιστροφείας χρειάζεται 76m ($4 \times 19\text{m}$) διατομής 6mm^2 για τον περιορισμό της πτώσης τάσης και των απωλειών.

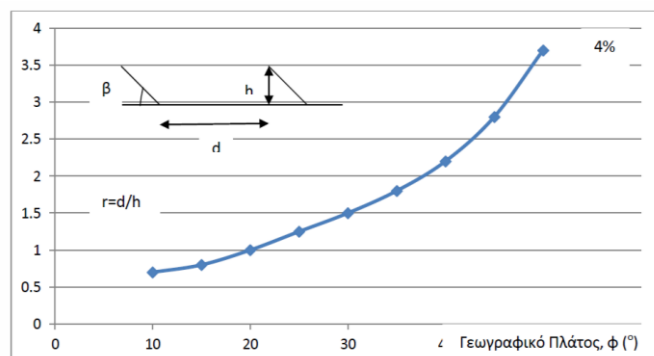


Σχήμα 4.3 Συνδεσμολογία ΦΒ πλαισίων

Τα μεταλλικά πλαίσια των πλαισίων γειώνονται μέσω της βάσης στήριξης, η οποία αποτελείται από χαλύβδινες δοκούς που φθάνουν σε βάθος $1,5\text{m}$ κάτω από το έδαφος. Επίσης, έχει τοποθετηθεί περιμετρική γείωση από χαλκό σε βάθος $0,5\text{m}$ και σε απόσταση $0,7\text{m}$ από τη βάση και $0,5\text{m}$ από τα καλώδια ισχύος περίπου.

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι λεπτομέρειες της χωροθέτησης διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών, οι οποίες θεωρούνται απείρου μήκους, εξετάζεται το αποτέλεσμα της σκίασης μιας συστοιχίας από την αμέσως νοτιότερή της. Το αποτέλεσμα της σκίασης συναρτάται με το λόγο $r=d/h$, της απόστασης d μεταξύ των συστοιχιών, ως προς το ύψος τους h . Με βάση αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο, προσδιορίζεται για αίθριες μέρες και για όλο το έτος, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς από διαδοχικά ΦΒ πλαίσια τοποθετημένα επί της κεκλιμένης συστοιχίας, κατά τη διεύθυνση βορρά-νότου. Όπως είναι αναμενόμενο, το αποτέλεσμα της σκίασης είναι εντονότερο στο χαμηλότερο ΦΒ πλαίσιο και μειώνεται προς το πιο ψηλά τοποθετημένο. Διερευνάται η εξάρτηση του λόγου r από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, υπό δεδομένη μέγιστη απώλεια λόγω σκίασης, κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο. Τέλος υπολογίζεται η αντίστοιχη με το λόγο r , μέση ετησίως ποσοστιαία ενεργειακή απώλεια.

Όπως προκύπτει από τη μελέτη αυτή αυξανόμενου του γεωγραφικού πλάτους, ο λόγος r αυξάνει έντονα, και συνακόλουθα, μειώνεται και το πλήθος των συστοιχιών που μπορούν να τοποθετηθούν ανά μονάδα μήκους, κατά τη διεύθυνση βορρά-νότου στον αντίστοιχο τόπο. Το σχήμα 4.4 δίνει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε για κάθε τόπο, τον κατάλληλο λόγο r , με βάση το μέσο ετήσιο ποσοστό ενεργειακών απωλειών λόγω της σκίασης, που λαμβάνεται υπόψη στα πλαίσια της μελέτης διαστασιολόγησης του ΦΒ συστήματος.



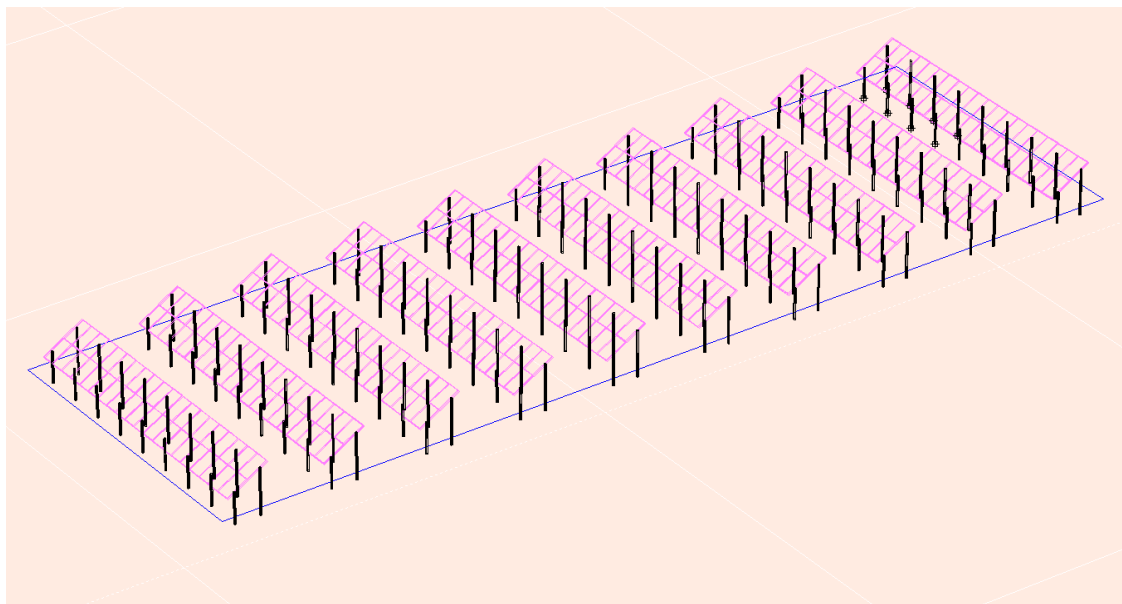
Σχήμα 4.4 Γραφική παράσταση του λόγου r , του διάκενου d μεταξύ των συστοιχιών προς το ύψος τους h , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Η καμπύλη αφορά σε μέσο ετήσιο ποσοστό απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία, λόγω σκίασης της από την παρουσία της αμέσως νοτιότερης της, 2,5 %, 4% και 7%.

Με καθορισμένο το λόγο r για το συγκεκριμένο τόπο η οριζόντια απόσταση S_{oe} (οριζόντιο έδαφος) που αποτελεί την επαναλαμβανόμενη απόσταση τοποθέτησης των συστοιχιών απείρου μήκους δίνεται:

$$\begin{aligned}
 S_{oe} &= d + b \times \cos\beta \\
 \text{ή } S_{oe} &= r \times h + b \times \cos\beta \\
 \text{ή } S_{oe}/b &= r \times \sin\beta + \cos\beta
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

όπου d το διάκενο μεταξύ των συστοιχιών, b το πλάτος της συστοιχίας και β η γωνία κλίσης της. Στην περίπτωση της παρούσας εγκατάστασης, με $\phi = 35,18^\circ$ προκύπτει από το σχήμα 3.2 $r = 1,8$ (ετήσιες απώλειες 4%) και από τους παραπάνω τύπους $S_{oe} = 3,6m$ περίπου.

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται το φωτοβολταϊκό σύστημα του προβλήματος σε τρισδιάστατη όψη.



Σχήμα 4.5 Φωτοβολταϊκό σύστημα σε τρισδιάστατη όψη

4.2 Διαδικασία επιλογής Στάθμης Προστασίας

Για τον υπολογισμό του μέσου αριθμού κεραυνών που μπορούν να πλήξουν τη κατασκευή λαμβάνουμε υπόψη τα στοιχεία της ΦΒ εγκατάστασης που φαίνονται στο πίνακα 4.1 και ακολουθείται η διαδικασία που αναλύεται στην παράγραφο 4.1.

T_d	25
N_g	2,236 κεραυνικά πλήγματα/έτος·km ²
C_1	2
H	2,2m
L	20m
W	65m
A_e	2558,85m ²

Πίνακας 4.1 Στοιχεία ΦΒ εγκατάστασης για τον υπολογισμό του μέσου αριθμού κεραυνών που μπορούν να την πλήξουν

Συνεπώς, προκύπτει $N_g = 0,011$.

Η αποδεκτή συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων για το παρόν πρόβλημα θεωρείται $2 \cdot 10^{-3}$ οπότε η αποτελεσματικότητα είναι:

$$E = 0,82 \longrightarrow \text{Στάθμη προστασίας III}$$

4.3 Προσομοίωση συλλεκτήριου συστήματος εξωτερικής εγκατάστασης αντικεραυνικής προστασίας

Η εξωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας στόχο έχει να συλλάβει τον κεραυνό πριν αυτό πλήξει την υπό προστασία κατασκευή, να διοχετεύσει το ρεύμα του κεραυνού από το σημείο του πλήγματος στη γη και να το διαχέει στο έδαφος χωρίς αυτό να προκαλεί θερμικές και μηχανικές ζημιές και επικίνδυνες υπερτάσεις για τους ανθρώπους και το υλικό. Η εξωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας αποτελείται από:

- το συλλεκτήριο σύστημα που προορίζεται να δέχεται τους κεραυνούς
- το σύστημα αγωγών καθόδου που εξασφαλίζει την όδευση του ρεύματος κεραυνού προς τη γη
- το σύστημα γείωσης που άγει και διαχέει το ρεύμα κεραυνού στο έδαφος

Το συλλεκτήριο σύστημα ενός συστήματος προστασίας από κεραυνούς, έχει σκοπό να συλλαμβάνει τα πλήγματα προφυλάσσοντας έτσι την κατασκευή. Η σχεδίαση του συλλεκτήριου συστήματος εξαρτάται από τη γεωμετρία και το μέγεθος καθώς επίσης και από την απαιτούμενη στάθμη προστασίας της κατασκευής που χρίζει προστασίας. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ζώνης προστασίας που παρέχει το συλλεκτήριο σύστημα είναι (α) η μέθοδος της γωνίας προστασίας, (β) η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας και (γ) η μέθοδος των βρόχων. Η μέθοδος της γωνίας προστασίας εφαρμόζεται στις περιπτώσεις όπου η υπό προστασία κατασκευή είναι απλή και το ύψος της h δεν ξεπερνά την ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας R .

Η ημιγωνία προστασίας λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον πίνακα 4.4 και εξαρτάται από την απαιτούμενη στάθμη προστασίας το ύψος h πάνω από την επιφάνεια που χρίζει προστασίας. Η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που η κατασκευή είναι πολύπλοκη ή όπου ο πίνακας 4.4 αποκλείει την εφαρμογή της μεθόδου γωνίας προστασίας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο σχεδιασμός του συλλεκτήριου συστήματος είναι κατάλληλος εάν κανένα σημείο της υπό προστασία κατασκευής δεν έρχεται σε επαφή με μία σφαίρα της οποίας η ακτίνα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = 8 \cdot I^{0.65} \quad (4.2)$$

Η ακτίνα της σφαίρας R συμπίπτει με την απόσταση διάσπασης S , την απόσταση δηλαδή που είναι ικανός ο κεραυνός να γεφυρώσει, και το ρεύμα κεραυνού I είναι γνωστό από πίνακες ανάλογα της στάθμης προστασίας.

Κατά την κύλιση της h σφαίρα πρέπει να εφάπτεται μόνο στο έδαφος ή/και στο συλλεκτήριο σύστημα. Τα υπόλοιπα σημεία που δεν έρχονται σε επαφή με τη σφαίρα είναι προστατευμένα. Άρα, η εγκατάσταση των συλλεκτήριων αγωγών είτε αυτοί αποτελούνται από κατακόρυφες

ράβδους είτε από πλέγμα αγωγών, γίνεται σε όλα τα σημεία της κατασκευής που έρχονται σε επαφή με τη σφαίρα.

Κατά τη μέθοδο των βρόχων, η κατασκευή που χρήζει προστασίας χωρίζεται σε τμήματα και ανάλογα με τη στάθμη προστασίας, επιλέγονται οι διαστάσεις του πλέγματος συλλεκτήριων αγωγών και η εγκατάσταση τους γίνεται ξεκινώντας από την περίμετρο της κατασκευής και καταλήγοντας στο κέντρο. Οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών είναι το πολύ ίσες με τις προκαθορισμένες από τη στάθμη προστασίας και η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται όταν ο πίνακας 4.2 αποκλείει την εφαρμογή της μεθόδου γωνίας προστασίας.

Στάθμη Προστασίας	h(m) R(m)	20	30	45	60	Διάσταση Πλέγματος (m)
		$\alpha^{(o)}$	A ^(o)	$\alpha^{(o)}$	$\alpha^{(o)}$	
I	20	25	*	*	*	5
II	30	35	25	*	*	10
III	45	45	35	25	*	10
IV	60	55	45	35	25	20

* Σ' αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζονται οι μέθοδοι της κυλιόμενης σφαίρας και πλέγματος αγωγών.

Πίνακας 4.2 Μέθοδοι προσδιορισμού ζώνης προστασίας συλλεκτήριου συστήματος

WinIGS

Το πρόγραμμα WinIGS (Integrated Grounding System analysis for Windows) επιτρέπει τη σχεδίαση κυκλωματικού μοντέλου όπου προσομοιώνονται κεραυνικά πλήγματα. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε η ΦΒ εγκατάσταση του προβλήματος και ελέγχθηκαν διαφορετικά συλλεκτήρια συστήματα με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας. Επίσης, το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής παραμέτρων όπως τη κλάση προστασίας του ΣΑΠ. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την εκτεθειμένη περιοχή και τον αναμενόμενο αριθμό των πληγμάτων ανά έτος ως συνάρτηση της μέγιστης τιμής του κεραυνικού ρεύματος, καθώς και τον συνολικό αριθμό των αναμενόμενων κεραυνών για οποιοδήποτε επιλεγμένο υποσύνολο των δομών του συστήματος ανάλυσης.

4.4 Μοντελοποίηση προβλήματος

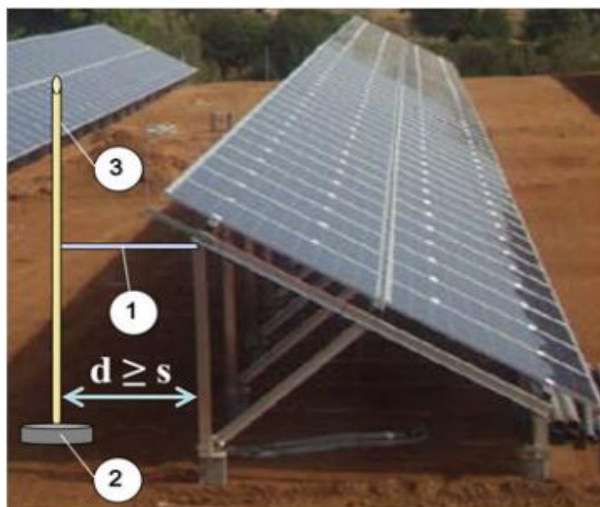
Με σκοπό τη σχεδίαση εναλλακτικών συστημάτων ερευνήθηκε η ελληνική αγορά στο τομέα της αντικεραυνικής προστασίας των ΦΒ πάρκων. Διαθέσιμα προϊόντα αποτελούν:

- Ακίδες που σχηματίζουν γωνία, προσαρτώνται στη βάση στήριξης και φθάνουν σε ύψος 0,6m πάνω από το υψηλότερο επίπεδο του ΦΒ πάνελ (μη απομονωμένο σύστημα) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.
- Ακίδες που διατηρούν απόσταση 0,5m από τις συστοιχίες, στηρίζονται σε ειδικές βάσεις στο επίπεδο του εδάφους και έχουν ύψος 3m (απομονωμένο σύστημα) όπως στο σχήμα 4.7.

Αξίζει να σημειωθεί πως ακίδες για απομονωμένο σύστημα είναι διαθέσιμες και σε μικρότερα ύψη που τα καθιστά ακατάλληλα για την εγκατάσταση αυτή καθώς φθάνει σε ύψος 2,2m.



Σχήμα 4.6 Μη απομονωμένη ακίδα προσαρτημένη στη βάση στήριξης

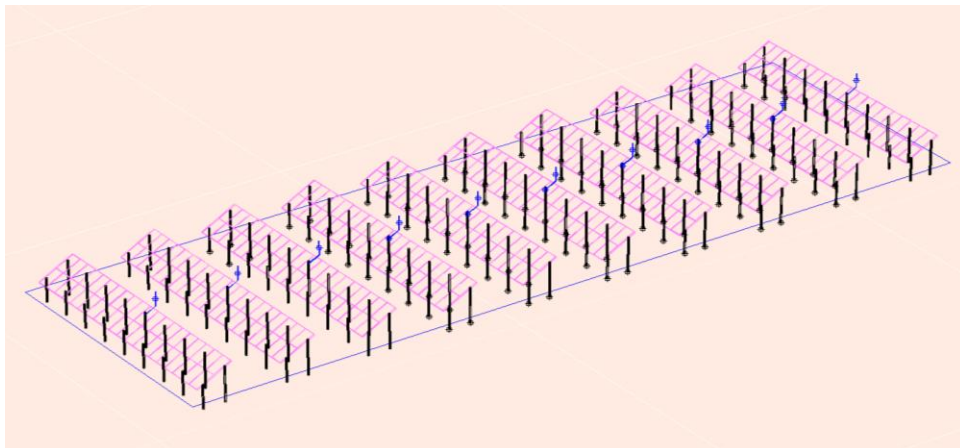


Σχήμα 4.7 Απομονωμένη ακίδα. 1) απομονωτής 2) βάση 3) ακίδα

Εναλλακτικά συστήματα	Αριθμός ακίδων	Ύψος ακίδων (m)	Απομονωμένο σύστημα
P1	10	0,6	OXI
P2	20	0,6	OXI
P3	30	0,6	OXI
P4	18	0,6	OXI
P5	6	3	NAI
P6	12	3	NAI

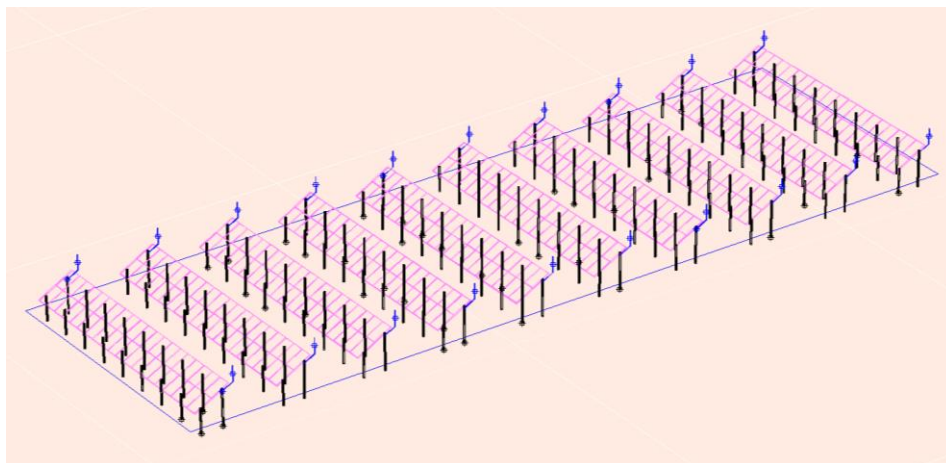
Πίνακας 4.3 Εναλλακτικά συλλεκτήρια συστήματα

P1: Μη-απομονωμένο σύστημα όπου μία ακίδα ανά ζευγάρι συστοιχιών είναι προσαρτημένη στη βάση στήριξης των πάνελ (όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8 – με μπλε χρώμα)



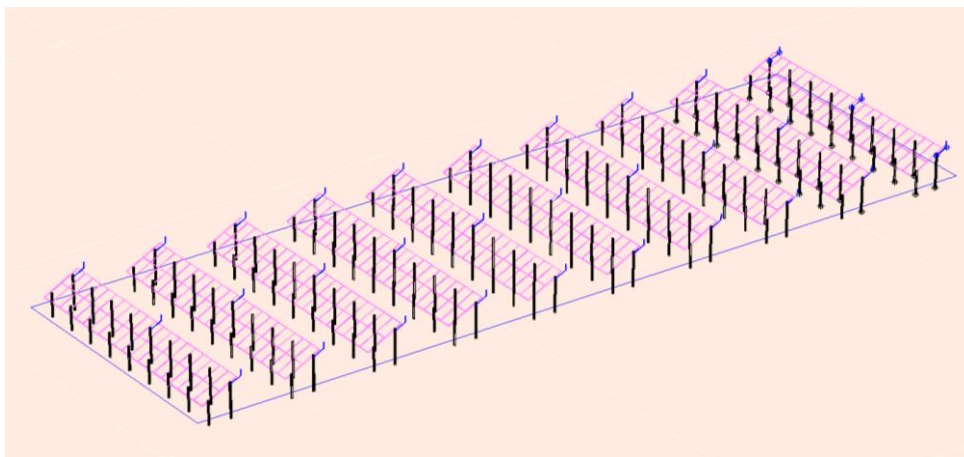
Σχήμα 4.8 Σύστημα P1 σε τρισδιάστατη όψη

P2: Μη-απομονωμένο σύστημα όπου δύο ακίδες προσαρτώνται στα άκρα των συστοιχιών (όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9 – με μπλε χρώμα)



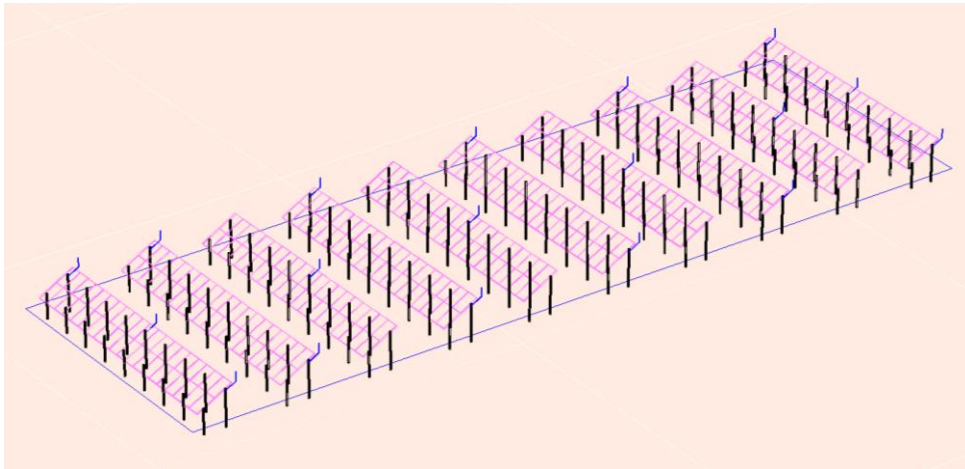
Σχήμα 4.9 Σύστημα P2 σε τρισδιάστατη όψη

P3: Μη-απομονωμένο σύστημα όπου δύο ακίδες προσαρτώνται στα άκρα των συστοιχιών και μία στη μέση (όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10 – με μπλε χρώμα)



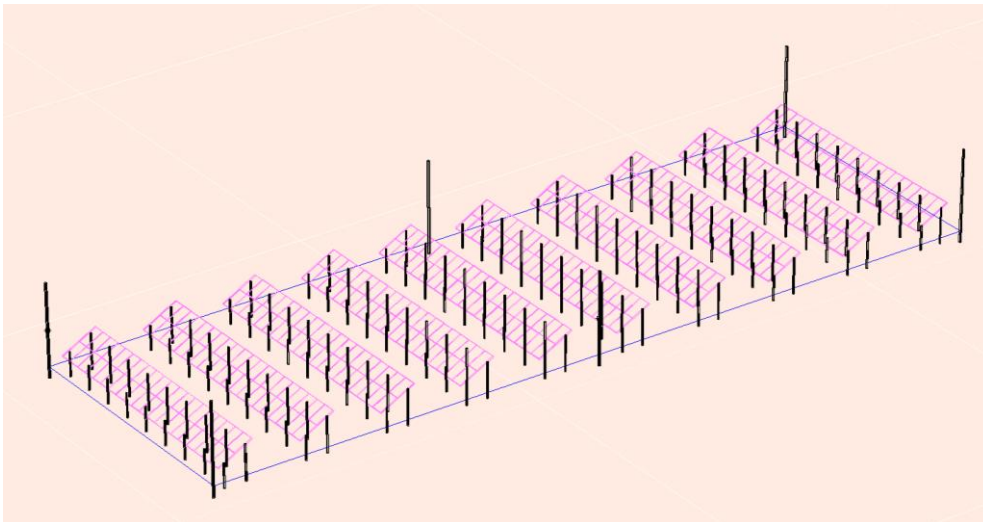
Σχήμα 4.10 Σύστημα P3 σε τρισδιάστατη όψη

P4: Μη-απομονωμένο σύστημα. Τρεις ακίδες προσαρτώνται στη νοτιότερη και βορειότερη συστοιχία ενώ στις ενδιάμεσες μία ή δύο ακίδες εναλλάξ (όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11 – με μπλε χρώμα)



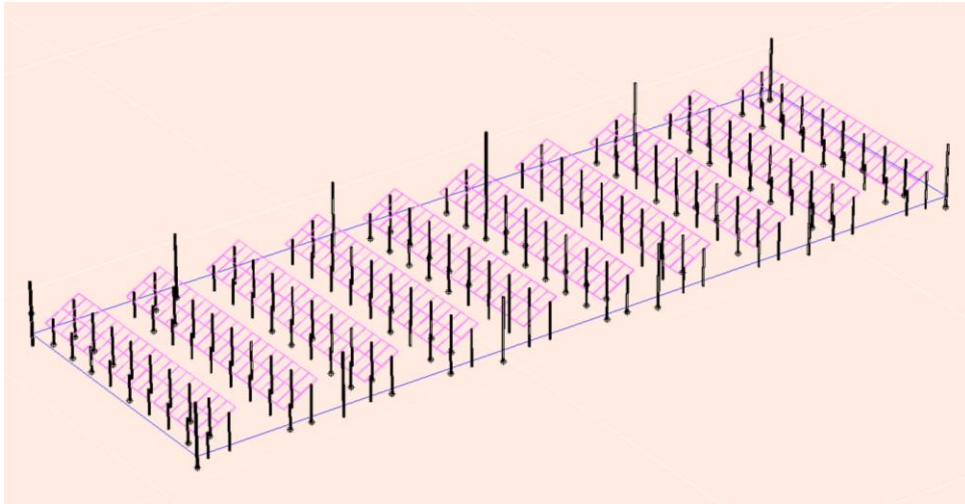
Σχήμα 4.11 Σύστημα P4 σε τρισδιάστατη όψη

P5: Απομονωμένο σύστημα που αποτελείται από έξι ακίδες τοποθετημένες περιμετρικά στο πάρκο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12 με μαύρο χρώμα.



Σχήμα 4.12 Σύστημα P5 σε τρισδιάστατη όψη

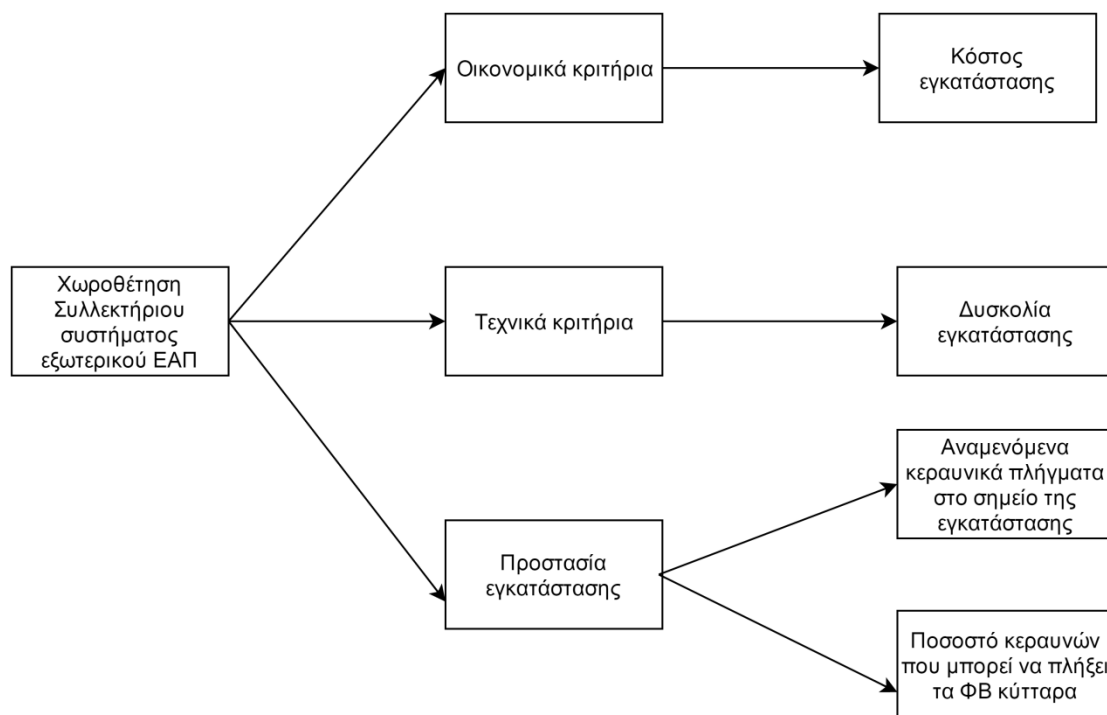
P6: Απομονωμένο σύστημα που αποτελείται από δώδεκα ακίδες τοποθετημένες περιμετρικά στο πάρκο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13 με μαύρο χρώμα.



Σχήμα 4.13 Σύστημα P6 σε τρισδιάστατη όψη

4.5 Σχεδιασμός Κριτηρίων Αξιολόγησης

Οι διεθνείς κανονισμοί δε προτείνουν συγκεκριμένα κριτήρια για την επιλογή των στοιχείων που απαρτίζουν το συλλεκτήριο σύστημα της εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας με συνέπεια η διερεύνηση των κριτηρίων αυτών να αποτελεί αρμοδιότητα του εκάστοτε μελετητή. Τα κριτήρια για τη κατάλληλη αξιολόγηση ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας θα πρέπει να είναι οικονομικά, τεχνικά και κριτήρια ασφαλείας ώστε να προκύπτει βέλτιστος συμβιβασμός μεταξύ κόστους και αποτελεσματικότητας σύμφωνα με τις επιλογές του αποφασίζοντα. Στο σχήμα 4.14 φαίνονται τα κριτήρια αξιολόγησης του προβλήματος που εξετάζεται στη παρούσα εργασία.



Σχήμα 4.14 Κριτήρια προβλήματος

g₁: Κόστος εγκατάστασης (€) (κόστος αγοράς, μεταφοράς και εγκατάστασης εξοπλισμού),(ποσοτικό)

g₂: Δυσκολία εγκατάστασης (αδιάστατο) (χρόνος και ανθρώπινο δυναμικό που απαιτείται για την εγκατάσταση του συστήματος),(ποιοτικό)

g₃: Αναμενόμενα κεραυνικά πλήγματα στην εγκατάσταση (πλήγματα/ έτος*10⁻³), (κεραυνικά πλήγματα σύμφωνα με τη γεωγραφική θέση της εγκατάστασης, το ύψος των κτισμάτων ή φυσικών στοιχείων πλησίον της εγκατάστασης και το ύψος των ακίδων που χρησιμοποιείται), (υπολογίζεται από το λογισμικό πακέτο WinIGS ως αποτέλεσμα προσομοίωσης κεραυνικών πληγμάτων στο κάθε εναλλακτικό σύστημα),(ποσοτικό)

g₄: Ποσοστό κεραυνών που μπορεί να πλήξει τα ΦΒ κύτταρα (%) (δεδομένης της τιμής του κριτηρίου g₃ υπολογίζεται από το λογισμικό πακέτο WinIGS ο αριθμός των κεραυνών που πλήττει τα ΦΒ κύτταρα και εξαγάγεται το ποσοστό προστασίας),(ποσοτικό)

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας των εναλλακτικών συλλεκτήριων συστημάτων καθώς και οι τιμές των κριτηρίων για τη κάθε δράση.

Δράσεις	Κριτήρια			
	g ₁ (€)	g ₂	g ₃ (*10 ⁻³)	g ₄ (%)
P1	152,20	Χαμηλή(2)	19,03	41,4
P2	304,4	Μέτρια(3)	19,31	6,4
P3	456,6	Μέτρια(2)	19,33	0
P4	228,3	Χαμηλή(2)	19,32	0,73
P5	563,04	Πολύ υψηλή(5)	21,70	14
P6	1126,1	Πολύ υψηλή(5)	22,12	1,5

Πίνακας 4.4: Τιμές κριτηρίων εναλλακτικών συστημάτων

Για την μέθοδο PROMETHEE II, θα χρησιμοποιηθεί κλίμακα 5 σημείων (5 point scale) στο κριτήριο g₂:

1=Πολύ χαμηλή, 2=Χαμηλή, 3=Μέτρια, 4=Υψηλή, 5=Πολύ υψηλή.

Επίσης, το πρώτο βήμα της μεθόδου UTASTAR, είναι ο υπολογισμών των ολικών αξιών των έξι εναλλακτικών συστημάτων. Γι' αυτό θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω κλίμακες κριτηρίων:

g₁:κλίμακα [g₁^{*},g₁^{*}]=[1200,900,650,400,150]

g₂:κλίμακα [g₂^{*},g₂^{*}]=[πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια, χαμηλή]

g₃:κλίμακα $[g_3^*,g_3^*]=[30,20,10]$

g₄:κλίμακα $[g_4^*,g_4^*]=[45,30,15,5,0]$



ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Για την επιλογή του καταλληλότερου συστήματος αντικεραυνικής προστασίας θα χρησιμοποιηθούν:

- Η σχεσιακή μέθοδος PROMETHEE II, λόγω της αποδοτικότητας της μεταξύ των μεθόδων σχέσεων υπεροχής και του σαφή προσδιορισμού προτιμήσεων.
- Η αναλυτική μέθοδος UTASTAR (Siskos & Yannacopoulos 1985) λόγω της πολυπλοκότητας που προκύπτει στην εύρεση συναρτήσεων αξίας.

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η μεθοδολογία και των δύο μεθόδων οι οποίες θα εφαρμοστούν για την επίλυση του προβλήματος. Στη συνέχεια θα αναλυθεί λεπτομερώς η διαδικασία εφαρμογής της κάθε μεθοδολογίας.

Εμπλεκόμενοι φορείς :

- Αποφασίζον: Υπεύθυνος κατασκευαστικής εταιρίας
- Αναλυτής: Μελετητής εγκατάστασης

5.1 Εφαρμογή μεθόδου PROMETHEE II

5.1.1 Υπολογισμός βαρών

Για τον υπολογισμό βαρών, ζητείται από τον αποφασίζοντα να κατατάξει τα κριτήρια από το πιο σημαντικό στο λιγότερο σημαντικό. Βάσει αυτής της κατάταξης, αποδίδεται σε ποσοστό η βαρύτητα της άποψης του αποφασίζοντος.

Βάρη	Κριτήρια			
	g1	g2	g3	g4
ROC	0.27	0.15	0.06	0.52

Πίνακας 5.1 Βάρη κριτηρίων (Rank Order Centroid)

5.1.2 Συναρτήσεις προτίμησης

Κατόπιν συζητήσεως με τον αποφασίζοντα, σχετικά με το κριτήριο g_1 , η διαφορά των 10 ευρώ ανά μονάδα θεωρείται αμελητέα. Επίσης εκφράζει απόλυτη προτίμηση στη διαφορά των 50 ευρώ ανά μονάδα.

Σχετικά με το κριτήριο g_4 , ο αποφασίζων θεωρεί αμελητέα την διαφορά του ποσοστού 1% των κεραυνών που μπορεί να πλήξει τα ΦΒ κύτταρα και εκφράζει απόλυτη προτίμηση στη διαφορά της τάξεως του 4%.

Στο κριτήριο g_3 , θα χρησιμοποιηθεί η usual συνάρτηση για να μην χαθεί πληροφορία καθώς οι διαφορές είναι ήδη μικρές.

Προτιμήσεις	Κριτήρια			
	g_1 (€)	g_2	$g_3(*10^{-3})$	$g_4(\%)$
Min/max	min	min	min	min
Συνάρτηση προτίμησης	Linear	usual	usual	linear
Κατώφλι αδιαφορίας q	10	-	-	1
Κατώφλι προτίμησης p	50	-	-	4

Πίνακας 5.2. Συναρτήσεις προτίμησης

5.1.3 Ροές υπεροχής και κατάταξη

Οι υπολογισμοί των αποστάσεων, των συναρτήσεων προτίμησης καθώς και των σταθμισμένων δεικτών, βρίσκονται αναλυτικά στους πίνακες Π1,Π2,Π3 και Π4 του παραρτήματος.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα της καθαρής υπεροχής:

Δράσεις	Φ^+	Φ^-	Φ
P1	0.45	0.52	-0.07
P2	0.478	0.492	-0.014
P3	0.522	0.258	0.264
P4	0.684	0.078	0.606
P5	0.17	0.8	-0.63
P6	0.312	0.468	-0.156

Πίνακας 5.3 Πλήρης κατάταξη μέσω της καθαρής ροής υπεροχής ϕ .

Δράσεις

P4

P3

P2

P1

P6

P5

Πίνακας 5.4 Κατάταξη Δράσεων

5.2 Εφαρμογή μεθόδου UTASTAR

5.2.1 Α' φάση

Κατασκευή εικονικών δράσεων

Για τον σχηματισμό του συνόλου των εικονικών δράσεων που είναι απαραίτητο για να εφαρμοστεί η μέθοδος, κατασκευάστηκαν 8 εικονικές δράσεις, στις οποίες δόθηκαν τιμές (scores) για το κάθε κριτήριο. Ο τρόπος που δόθηκαν οι τιμές αυτές ήταν τέτοιος έτσι ώστε, από την μία πλευρά, να παρουσιάζουν ρεαλιστικές αναφορές στο κάθε κριτήριο και από την άλλη να καλύπτεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος των τιμών που παρουσιάζουν οι αληθινές δράσεις, συμπεριλαμβανομένων κάποιων ακραίων τιμών. Κατά συνέπεια, γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί ένα αρκετά μεγάλο πλαίσιο πιθανόν σεναρίων, έτσι ώστε το αποτέλεσμα που θα εξαχθεί να έχει προκύψει από ένα ικανοποιητικό σύνολο δεδομένων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι 8 εικονικές δράσεις με τις αντίστοιχες βαθμολογίες τους σε κάθε κριτήριο:

Δράσεις	g1	g2	g3	g4
Z1	650	Υψηλή	30	0
Z2	650	Πολύ υψηλή	10	0
Z4	400	Υψηλή	30	15
Z6	400	Μέτρια	30	30
Z8	150	Υψηλή	10	45
Z11	900	Μέτρια	30	15
Z12	1200	Μέτρια	20	0
Z13	1200	Χαμηλή	30	0

Πίνακας 5.5.: Εικονικές δράσεις

Κατάταξη εικονικών δράσεων

Στην συνέχεια, το σύνολο των εικονικών δράσεων δίνεται στον αποφασίζοντα έτσι ώστε να τις κατατάξει σύμφωνα με τα δικά του προτιμησιακά δεδομένα. Αυτό σημαίνει ότι ο αποφασίζον θα συγκρίνει τις εικονικές δράσεις μεταξύ τους και εν τέλει θα τις επιστρέψει σε προδιατεταγμένη σειρά.

Δράσεις	g1	g2	g3	g4	Σειρά
Z1	650	Υψηλή	30	0	1
Z2	650	Πολύ υψηλή	10	0	2
Z13	1200	Χαμηλή	30	0	3
Z12	1200	Μέτρια	20	0	4
Z4	400	Υψηλή	30	15	5
Z11	900	Μέτρια	30	15	6
Z6	400	Μέτρια	30	30	7
Z8	150	Υψηλή	10	45	8

Πίνακας 5.6: Κατάταξη 8 εικονικών δράσεων

Μέθοδος UTASTAR

Βήμα 1

Σύμφωνα με το πρώτο βήμα του αλγορίθμου UTASTAR υπολογίζονται οι ακόλουθες εκφράσεις :

$$u(g(Z1)) = u_1(650) + u_2(\text{high}) + u_3(30) + u_4(0) =$$

$$= w_{11} + w_{12} + w_{21} + 0 + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44}$$

$$u(g(Z2)) = u_1(650) + u_2(\text{very high}) + u_3(10) + u_4(0) =$$

$$= w_{11} + w_{12} + 0 + w_{31} + w_{32} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44}$$

$$u(g(Z13)) = u_1(1200) + u_2(\text{low}) + u_3(30) + u_4(0) =$$

$$= 0 + w_{21} + w_{22} + w_{23} + 0 + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44}$$

$$u(g(Z12)) = u_1(1200) + u_2(\text{medium}) + u_3(20) + u_4(0) =$$

$$= 0 + w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44}$$

$$u(g(Z4)) = u_1(400) + u_2(\text{high}) + u_3(30) + u_4(15) =$$

$$= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + 0 + w_{41} + w_{42}$$

$$u(g(Z11)) = u_1(900) + u_2(\text{medium}) + u_3(30) + u_4(15) =$$

$$= w_{11} + w_{21} + w_{22} + 0 + w_{41} + w_{42}$$

$$u(g(Z6)) = u_1(400) + u_2(\text{medium}) + u_3(30) + u_4(30) =$$

$$= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{22} + 0 + w_{41}$$

$$u(g(Z8)) = u_1(150) + u_2(\text{high}) + u_3(10) + u_4(45) =$$

$$= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{21} + w_{31} + w_{32} + 0$$

Βήμα 2

Για κάθε ζεύγος εικονικών δράσεων σύμφωνα με τη προδιάταξη υπολογίζονται οι παρακάτω διαφορές εισάγοντας δύο συναρτήσεις σφάλματος σ^+ και σ^- στο A_R :

$$\Delta(Z1,Z2) = w_{11} + w_{12} + w_{21} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1)$$

$$- (w_{11} + w_{12} + w_{31} + w_{32} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2))$$

$$= w_{21} - w_{31} - w_{32} - \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) - \sigma^-(Z2)$$

$$\Delta(Z2,Z13) = w_{11} + w_{12} + w_{31} + w_{32} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2)$$

$$\begin{aligned}
 & - (w_{21} + w_{22} + w_{23} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13)) \\
 & = w_{11} + w_{12} - w_{21} - w_{22} - w_{23} + w_{31} + w_{32} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z13) - \sigma^-(Z13) \\
 \Delta(Z13,Z12) & = w_{21} + w_{22} + w_{23} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) \\
 & - (w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12)) \\
 & = w_{23} - w_{31} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) + \sigma^+(Z12) - \sigma^-(Z12) \\
 \Delta(Z12,Z4) & = w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) \\
 & - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4)) \\
 & = -w_{11} - w_{12} - w_{13} + w_{22} + w_{31} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z4) - \sigma^-(Z4) \\
 \Delta(Z4,Z11) & = w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) \\
 & - (w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11)) \\
 & = w_{12} + w_{13} - w_{22} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z11) - \sigma^-(Z11) \\
 \Delta(Z11,Z6) & = w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) \\
 & - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6)) \\
 & = -w_{12} - w_{13} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z6) - \sigma^-(Z6) \\
 \Delta(Z6,Z8) & = w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) \\
 & - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{21} + w_{31} + w_{32} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6)) \\
 & = -w_{14} + w_{22} - w_{31} - w_{32} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) + \sigma^+(Z8) - \sigma^-(Z8)
 \end{aligned}$$

Βήμα 3

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις θα λυθεί το ακόλουθο γραμμικό πρόγραμμα :

$$\begin{aligned}
 [\min] z & = \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) + \sigma^+(Z8) + \\
 & \sigma^-(Z8) + \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) \\
 w_{21} - w_{31} - w_{32} & - \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) - \sigma^-(Z2) \geq 0.01 \\
 w_{11} + w_{12} - w_{21} - w_{22} - w_{23} + w_{31} + w_{32} & - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z13) - \sigma^-(Z13) \geq 0.01 \\
 w_{23} - w_{31} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) + \sigma^+(Z12) & - \sigma^-(Z12) \geq 0.01 \\
 -w_{11} - w_{12} - w_{13} + w_{22} + w_{31} + w_{43} + w_{44} & - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z4) - \sigma^-(Z4) \geq 0.01 \\
 w_{12} + w_{13} - w_{22} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z11) & - \sigma^-(Z11) \geq 0.01 \\
 -w_{12} - w_{13} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z6) & - \sigma^-(Z6) \geq 0.01 \\
 -w_{14} + w_{22} - w_{31} - w_{32} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) & + \sigma^+(Z8) - \sigma^-(Z8) \geq 0.01
 \end{aligned}$$

Αρχικά τίθεται το $\delta = 0,01$.

Βήμα 4

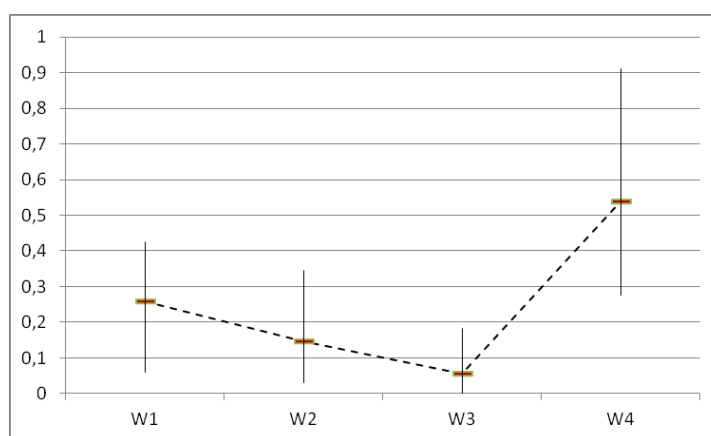
Από της λύση $z = 0$ του παραπάνω γραμμικού προγράμματος προκύπτει ότι όλα τα σφάλματα είναι μηδενικά το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει μία τουλάχιστον συνάρτηση προσθετικής αξίας η οποία είναι πλήρης συμβατή με την προδιάταξη των 8 εικονικών δράσεων.

Εφόσον τα σφάλματα είναι μηδενικά μπορούμε να προχωρήσουμε στον προσδιορισμό των τιμών των βαρών w_{ij} . Για να γίνει αυτό πρέπει να μπου στην αντικειμενική συνάρτηση τα

βάρη w_{ij} με σκοπό την μεγιστοποίηση – ελαχιστοποίησή τους. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό, ότι τα βάρη θα μπου με την μορφή αθροισμάτων και όχι ως μεμονωμένες τιμές. Αυτή η ιδιομορφία της UTASTAR, σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους UTA οφείλεται στην διακριτοποιημένη μορφή στην οποία σχηματίσαμε τα πεδία τιμών των κριτηρίων.

Συμφώνα με το τέταρτο βήμα του αλγορίθμου UTASTAR ο αναλυτής αναζητά $2(4+3+2+4)=26$ λύσεις μεγιστοποιώντας και ελαχιστοποιώντας την συνάρτηση αυτή και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα Π.5 του παραρτήματος.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα τα εύρη των βαρών των 4 κριτηρίων, όπου $W1=w_{11}+w_{12}+w_{13}+w_{14}$ κ.ο.κ.. Η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την μέση τιμή όλων των τρεξιμάτων.

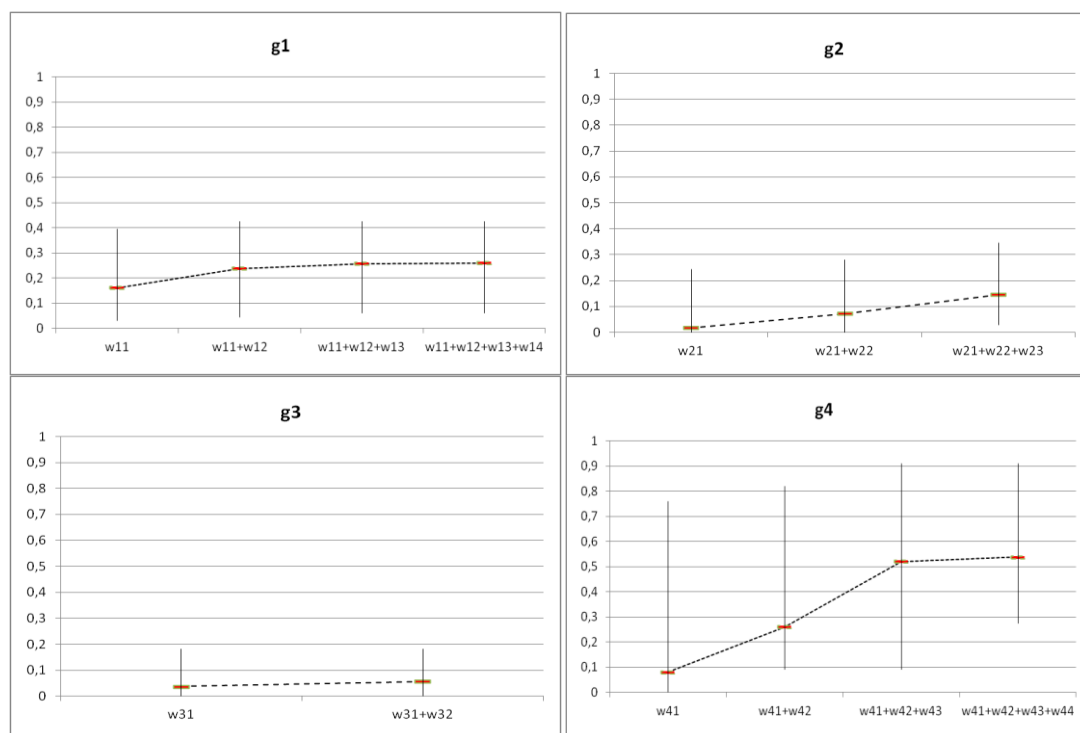


Σχήμα 5.1: Εύρη βαρών κριτηρίων για 8 εικονικές δράσεις

Στο σχήμα 5.2 φαίνονται οι περιθώριες συναρτήσεις για τα τέσσερα κριτήρια όπως διαμορφώθηκαν για τα δεδομένα των 8 εικονικών δράσεων.

Εκτίμηση ευστάθειας

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, διακρίνεται ότι τα εύρη των κριτηρίων είναι πολύ μεγάλα σε σχέση με την κλίμακα τιμών στην οποία κινούνται. Επομένως η ευστάθεια του μοντέλου σε αυτή τη φάση είναι ανεπαρκής, γεγονός που επιβεβαιώνεται με τον εξαιρετικά χαμηλό δείκτη ASI που παίρνει τη τιμή 0,494.



Σχήμα 5.2: Περιθώριες συναρτήσεις κριτηρίων για 8 εικονικές δράσεις

5.2.2 Β' φάση

Σε ακολουθία της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στην Α' φάση, κατασκευάζονται επιπλέον 3 εικονικές δράσεις. Καλείται, εδώ, ο αποφασίζοντας να ενσωματώσει τις 3 επιπλέον δράσεις στην κατάταξη που ήδη έχει καθορίσει στην πρώτη φάση.

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζεται η νέα κατάταξη των 11 εικονικών δράσεων όπως αυτή σχηματίστηκε από τον αποφασίζοντα μετά την εισαγωγή νέων δεδομένων.

Δράσεις	G1	G2	G3	G4	Σειρά
Z1	650	Υψηλή	30	0	1
Z2	650	Πολύ υψηλή	10	0	2
Z9	900	Μέτρια	30	0	3
Z13	1200	Χαμηλή	30	0	4
Z12	1200	Μέτρια	20	0	5
Z5	400	Πολύ υψηλή	30	5	6
Z3	650	Μέτρια	30	5	6
Z4	400	Υψηλή	30	15	8
Z11	900	Μέτρια	30	15	9
Z6	400	Μέτρια	30	30	10
Z8	150	Υψηλή	10	45	11

Πίνακας 5.7: Κατάταξη των 11 εικονικών δράσεων

Μέθοδος UTASTAR

Βήμα 1

Σύμφωνα με το πρώτο βήμα του αλγορίθμου UTASTAR υπολογίζεται η ολική αξία των νέων δράσεων ως συνάρτηση των περιθωρίων αξιών $u_i(g_i)$ και στη συνέχεια των μεταβλητών w_{ij} :

$$\begin{aligned} u(g(Z9)) &= u_1(900) + u_2(\text{medium}) + u_3(30) + u_4(0) = \\ &= w_{11} + w_{21} + w_{22} + 0 + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(g(Z5)) &= u_1(400) + u_2(\text{very high}) + u_3(30) + u_4(5) = \\ &= w_{11} + w_{12} + w_{13} + 0 + 0 + w_{41} + w_{42} + w_{43} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(g(Z3)) &= u_1(650) + u_2(\text{medium}) + u_3(30) + u_4(5) = \\ &= w_{11} + w_{12} + w_{21} + w_{22} + 0 + w_{41} + w_{42} + w_{43} \end{aligned}$$

Βήμα 2

Για κάθε ζεύγος εικονικών δράσεων σύμφωνα με τη προδιάταξη υπολογίζονται οι παρακάτω διαφορές εισάγοντας δύο συναρτήσεις σφάλματος σ^+ και σ^- στο A_R :

$$\Delta(Z1,Z2) = w_{21} - w_{31} - w_{32} - \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) - \sigma^-(Z2)$$

$$\begin{aligned} \Delta(Z2,Z9) &= w_{11} + w_{12} + w_{31} + w_{32} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) \\ &\quad - (w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9)) \\ &= w_{12} - w_{21} - w_{22} + w_{31} + w_{32} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z9) - \sigma^-(Z9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta(Z9,Z13) &= w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9) \\ &\quad - (w_{21} + w_{22} + w_{23} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13)) \\ &= w_{11} - w_{23} - \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9) + \sigma^+(Z13) - \sigma^-(Z13) \end{aligned}$$

$$\Delta(Z13,Z12) = w_{23} - w_{31} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) + \sigma^+(Z12) - \sigma^-(Z12)$$

$$\begin{aligned} \Delta(Z12,Z5) &= w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) \\ &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{42} + w_{43} - \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5)) \\ &= -w_{11} - w_{12} - w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z5) - \sigma^-(Z5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta(Z5,Z3) &= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{42} + w_{43} - \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5) \\ &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} + w_{43} - \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3)) \\ &= w_{13} - w_{21} - w_{22} - \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5) + \sigma^+(Z3) - \sigma^-(Z3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta(Z3,Z4) &= w_{11} + w_{12} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} + w_{43} - \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3) \\ &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4)) \\ &= -w_{13} + w_{22} + w_{43} - \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3) + \sigma^+(Z4) - \sigma^-(Z4) \end{aligned}$$

$$\Delta(Z4,Z11) = w_{12} + w_{13} - w_{22} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z11) - \sigma^-(Z11)$$

$$\Delta(Z11,Z6) = -w_{12} - w_{13} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z6) - \sigma^-(Z6)$$

$$\Delta(Z6,Z8) = -w_{14} + w_{22} - w_{31} - w_{32} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) + \sigma^+(Z8) - \sigma^-(Z8)$$

Βήμα 3

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις θα λυθεί το ακόλουθο γραμμικό πρόγραμμα :

$$[\min] z = \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3) + \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5) + \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) + \sigma^+(Z8) + \sigma^-(Z8) + \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9) + \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13)$$

$$w_{21} - w_{31} - w_{32} - \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) - \sigma^-(Z2) \geq 0.01$$

$$w_{12} - w_{21} - w_{22} + w_{31} + w_3 - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z9) - \sigma^-(Z9) \geq 0.01$$

$$w_{11} - w_{23} - \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9) + \sigma^+(Z13) - \sigma^-(Z13) \geq 0.01$$

$$w_{23} - w_{31} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) + \sigma^+(Z12) - \sigma^-(Z12) \geq 0.01$$

$$- w_{11} - w_{12} - w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z5) - \sigma^-(Z5) \geq 0.01$$

$$w_{13} - w_{21} - w_{22} - \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5) + \sigma^+(Z3) - \sigma^-(Z3) = 0$$

$$- w_{13} + w_{22} + w_{43} - \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3) + \sigma^+(Z4) - \sigma^-(Z4) \geq 0.01$$

$$w_{12} + w_{13} - w_{22} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z11) - \sigma^-(Z11) \geq 0.01$$

$$- w_{12} - w_{13} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z6) - \sigma^-(Z6) \geq 0.01$$

$$- w_{14} + w_{22} - w_{31} - w_{32} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) + \sigma^+(Z8) - \sigma^-(Z8) \geq 0.01$$

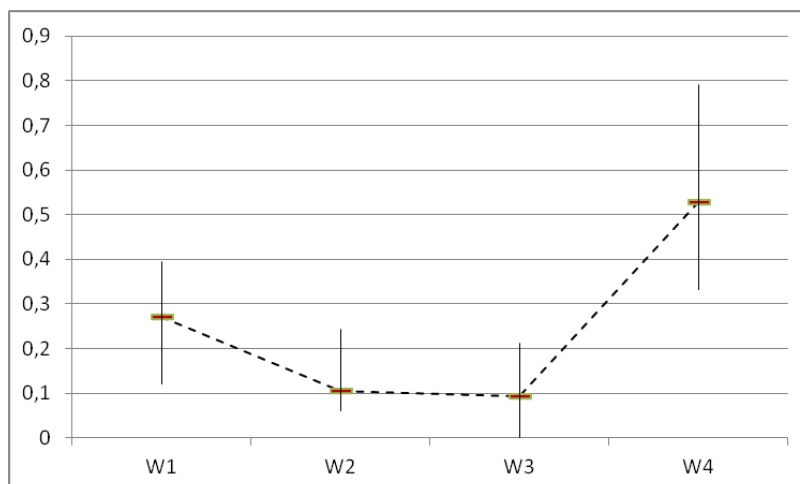
Αρχικά τίθεται το $\delta = 0,01$.

Βήμα 4

Από της λύση $z = 0$ του παραπάνω γραμμικού προγράμματος προκύπτει ότι όλα τα σφάλματα είναι μηδενικά το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει μία τουλάχιστον συνάρτηση προσθετικής αξίας η οποία είναι πλήρης συμβατή με την προδιάταξη των 11 εικονικών δράσεων.

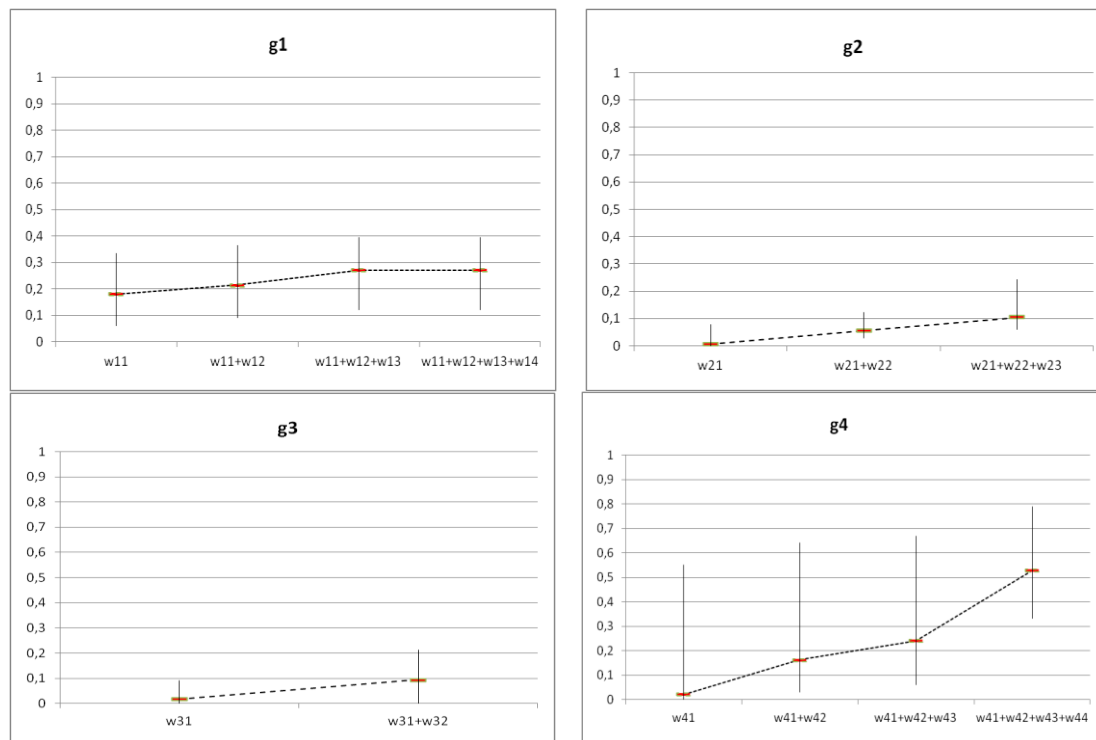
Εφόσον τα σφάλματα είναι μηδενικά μπορούμε να προχωρήσουμε στον προσδιορισμό των τιμών των βαρών w_{ij} . Όπως και στη πρώτη φάση, ο αναλυτής αναζητά $2(4+3+2+4)=26$ λύσεις μεγιστοποιώντας και ελαχιστοποιώντας την συνάρτηση αυτή και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα Π.6 του παραρτήματος.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα τα εύρη των βαρών των 4 κριτηρίων, όπου $W1=w_{11}+w_{12}+w_{13}+w_{14}$ κ.ο.κ. Η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την μέση τιμή όλων των τρεξιμάτων.



Σχήμα 5.3: Έυρη βαρών κριτηρίων για 11 εικονικές δράσεις

Στο σχήμα 5.4 φαίνονται οι περιθώριες συναρτήσεις για τα τέσσερα κριτήρια όπως διαμορφώθηκαν για τα δεδομένα των 11 εικονικών δράσεων.



Σχήμα 5.4: Περιθώριες συναρτήσεις κριτηρίων για 11 εικονικές δράσεις

Εκτίμηση ευστάθειας

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, διακρίνεται μια βελτίωση στα εύρη των κριτηρίων, αλλά ειδικά στο 4^ο κριτήριο εξακολουθούν να είναι μεγάλα σε σχέση με την κλίμακα τιμών στην οποία κινούνται. Επομένως η ευστάθεια του μοντέλου και σε αυτή τη φάση είναι ανεπαρκής, γεγονός που επιβεβαιώνεται με τον χαμηλό δείκτη ASI που παίρνει τη τιμή 0,64.

5.2.3 Γ' φάση

Σε ακολουθία της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στην Β' φάση, κατασκευάζονται επιπλέον 3 εικονικές δράσεις. Καλείται ξανά ο αποφασίζων να ενσωματώσει τις 3 επιπλέον δράσεις στην κατάταξη που ήδη έχει καθορίσει στην δεύτερη φάση.

Στον Πίνακα 5.8 εμφανίζεται η νέα κατάταξη των 14 εικονικών δράσεων όπως αυτή σχηματίστηκε από τον αποφασίζοντα μετά την εισαγωγή νέων δεδομένων.

Δράσεις	G1	G2	G3	G4	Σειρά
Z1	650	Υψηλή	30	0	1
Z2	650	Πολύ υψηλή	10	0	2
Z9	900	Μέτρια	30	0	3
Z13	1200	Χαμηλή	30	0	4
Z10	900	Πολύ υψηλή	20	0	5
Z12	1200	Μέτρια	20	0	5
Z5	400	Πολύ υψηλή	30	5	7
Z3	650	Μέτρια	30	5	7
Z4	400	Υψηλή	30	15	9
Z11	900	Μέτρια	30	15	10
Z6	400	Μέτρια	30	30	11
Z7	150	Μέτρια	30	45	12
Z14	1200	Μέτρια	10	30	13
Z8	150	Υψηλή	10	45	13

Πίνακας 5.8: Κατάταξη 14 εικονικών δράσεων

Μέθοδος UTASTAR

Βήμα 1

Σύμφωνα με το πρώτο βήμα του αλγορίθμου UTASTAR υπολογίζεται η ολική αξία των νέων δράσεων ως συνάρτηση των περιθώριων αξιών $u_i(g_i)$ και στη συνέχεια των μεταβλητών w_{ij} :

$$u(g(Z10)) = u_1(900) + u_2(\text{very high}) + u_3(20) + u_4(0) = \\ = w_{11} + 0 + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44}$$

$$u(g(Z7)) = u_1(150) + u_2(\text{medium}) + u_3(30) + u_4(45) = \\ = w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{21} + w_{22} + 0 + 0$$

$$u(g(Z14)) = u_1(1200) + u_2(\text{medium}) + u_3(10) + u_4(30) = \\ = 0 + w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{32} + w_{41}$$

Βήμα 2

Για κάθε ζεύγος εικονικών δράσεων σύμφωνα με τη προδιάταξη υπολογίζονται οι παρακάτω διαφορές εισάγοντας δύο συναρτήσεις σφάλματος σ^+ και σ^- στο A_R :

$$\Delta(Z1,Z2) = w_{11} + w_{12} + w_{21} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) \\ - (w_{11} + w_{12} + w_{31} + w_{32} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2)) \\ = w_{21} - w_{31} - w_{32} - \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) - \sigma^-(Z2)$$

$$\Delta(Z2,Z9) = w_{11} + w_{12} + w_{31} + w_{32} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) \\ - (w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9)) \\ = w_{12} - w_{21} - w_{22} + w_{31} + w_{32} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z9) - \sigma^-(Z9)$$

$$\Delta(Z9,Z13) = w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9) \\ - (w_{21} + w_{22} + w_{23} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13))$$

$$\begin{aligned}
 &= w_{11} - w_{23} - \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9) + \sigma^+(Z13) - \sigma^-(Z13) \\
 \Delta(Z13,Z10) &= w_{21} + w_{22} + w_{23} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) \\
 &\quad - (w_{11} + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z10) + \sigma^-(Z10)) \\
 &= -w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{23} - w_{31} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) + \sigma^+(Z10) - \sigma^-(Z10) \\
 \Delta(Z10,Z12) &= w_{11} + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z10) + \sigma^-(Z10) \\
 &\quad - (w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12)) \\
 &= w_{11} - w_{21} - w_{22} - \sigma^+(Z10) + \sigma^-(Z10) + \sigma^+(Z12) - \sigma^-(Z12) \\
 \Delta(Z12,Z5) &= w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) \\
 &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{42} + w_{43} - \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5)) \\
 &= -w_{11} - w_{12} - w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z5) - \sigma^-(Z5) \\
 \Delta(Z5,Z3) &= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{42} + w_{43} - \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5) \\
 &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} + w_{43} - \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3)) \\
 &= w_{13} - w_{21} - w_{22} - \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5) + \sigma^+(Z3) - \sigma^-(Z3) \\
 \Delta(Z3,Z4) &= w_{11} + w_{12} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} + w_{43} - \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3) \\
 &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4)) \\
 &= -w_{13} + w_{22} + w_{43} - \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3) + \sigma^+(Z4) - \sigma^-(Z4) \\
 \Delta(Z4,Z11) &= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) \\
 &\quad - (w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11)) \\
 &= w_{12} + w_{13} - w_{22} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z11) - \sigma^-(Z11) \\
 \Delta(Z11,Z6) &= w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{41} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) \\
 &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6)) \\
 &= -w_{12} - w_{13} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z6) - \sigma^-(Z6) \\
 \Delta(Z6,Z7) &= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) \\
 &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{21} + w_{22} - \sigma^+(Z7) + \sigma^-(Z7)) \\
 &= -w_{14} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) + \sigma^+(Z7) - \sigma^-(Z7) \\
 \Delta(Z7,Z14) &= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{21} + w_{22} - \sigma^+(Z7) + \sigma^-(Z7) \\
 &\quad - (w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{32} + w_{41} - \sigma^+(Z14) + \sigma^-(Z14)) \\
 &= w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{14} - w_{31} - w_{31} - w_{41} - \sigma^+(Z7) + \sigma^-(Z7) + \sigma^+(Z14) - \sigma^-(Z14) \\
 \Delta(Z14,Z8) &= w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{32} + w_{41} - \sigma^+(Z14) + \sigma^-(Z14) \\
 &\quad - (w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{41} + w_{21} + w_{31} + w_{32} - \sigma^+(Z8) + \sigma^-(Z8)) \\
 &= -w_{11} - w_{12} - w_{13} - w_{14} + w_{22} + w_{41} - \sigma^+(Z14) + \sigma^-(Z14) + \sigma^+(Z8) - \sigma^-(Z8)
 \end{aligned}$$

Βήμα 3

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις θα λυθεί το ακόλουθο γραμμικό πρόγραμμα :

$$\begin{aligned}
 [\min] z &= \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3) + \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z5) + \\
 &\sigma^-(Z5) + \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) + \sigma^+(Z7) + \sigma^-(Z7) + \sigma^+(Z8) + \sigma^-(Z8) + \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9) + \sigma^+(Z10) + \\
 &\sigma^-(Z10) + \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) + \sigma^+(Z14) + \sigma^-(Z14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{21} - w_{31} - w_{32} - \sigma^+(Z1) + \sigma^-(Z1) + \sigma^+(Z2) - \sigma^-(Z2) &\geq 0.01 \\
 w_{12} - w_{21} - w_{22} + w_{31} + w_{32} - \sigma^+(Z2) + \sigma^-(Z2) + \sigma^+(Z9) - \sigma^-(Z9) &\geq 0.01 \\
 w_{11} - w_{23} - \sigma^+(Z9) + \sigma^-(Z9) + \sigma^+(Z13) - \sigma^-(Z13) &\geq 0.01 \\
 - w_{11} + w_{21} + w_{22} + w_{23} - w_{31} - \sigma^+(Z13) + \sigma^-(Z13) + \sigma^+(Z10) - \sigma^-(Z10) &\geq 0.01 \\
 w_{11} - w_{21} - w_{22} - \sigma^+(Z10) + \sigma^-(Z10) + \sigma^+(Z12) - \sigma^-(Z12) &= 0 \\
 - w_{11} - w_{12} - w_{13} + w_{21} + w_{22} + w_{31} + w_{44} - \sigma^+(Z12) + \sigma^-(Z12) + \sigma^+(Z5) - \sigma^-(Z5) &\geq 0.01 \\
 w_{13} - w_{21} - w_{22} - \sigma^+(Z5) + \sigma^-(Z5) + \sigma^+(Z3) - \sigma^-(Z3) &= 0 \\
 - w_{13} + w_{22} + w_{43} - \sigma^+(Z3) + \sigma^-(Z3) + \sigma^+(Z4) - \sigma^-(Z4) &\geq 0.01 \\
 w_{12} + w_{13} - w_{22} - \sigma^+(Z4) + \sigma^-(Z4) + \sigma^+(Z11) - \sigma^-(Z11) &\geq 0.01 \\
 - w_{12} - w_{13} + w_{42} - \sigma^+(Z11) + \sigma^-(Z11) + \sigma^+(Z6) - \sigma^-(Z6) &\geq 0.01 \\
 - w_{14} + w_{41} - \sigma^+(Z6) + \sigma^-(Z6) + \sigma^+(Z7) - \sigma^-(Z7) &\geq 0.01 \\
 w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{14} - w_{31} - w_{31} - w_{41} - \sigma^+(Z7) + \sigma^-(Z7) + \sigma^+(Z14) - \sigma^-(Z14) &\geq 0.01 \\
 - w_{11} - w_{12} - w_{13} - w_{14} + w_{22} + w_{41} - \sigma^+(Z14) + \sigma^-(Z14) + \sigma^+(Z8) - \sigma^-(Z8) &= 0
 \end{aligned}$$

Αρχικά τίθεται το $\delta = 0,01$.

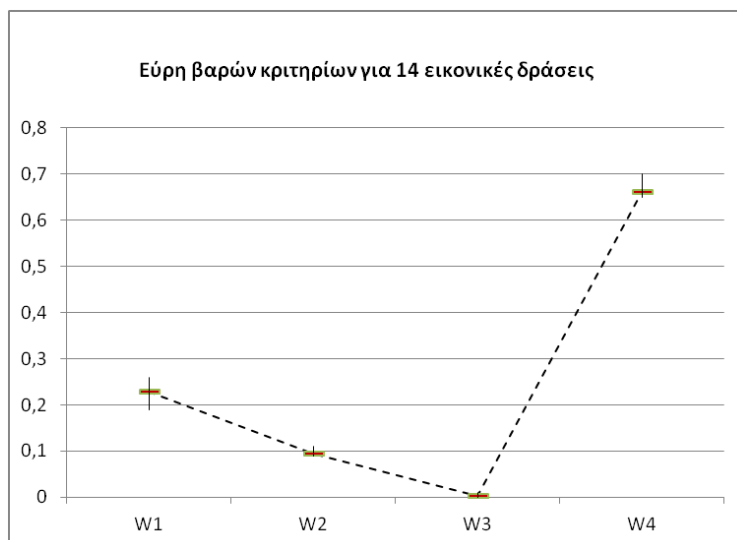
Βήμα 4

Από τη λύση $z = 0$ του παραπάνω γραμμικού προγράμματος προκύπτει ότι όλα τα σφάλματα είναι μηδενικά το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει μία τουλάχιστον συνάρτηση προσθετικής αξίας η οποία είναι πλήρης συμβατή με την προδιάταξη των 14 εικονικών δράσεων.

Εφόσον τα σφάλματα είναι μηδενικά μπορούμε να προχωρήσουμε στον προσδιορισμό των τιμών των βαρών w_{ij} . Για να γίνει αυτό πρέπει να μπου στην αντικειμενική συνάρτηση τα βάρη w_{ij} με σκοπό την μεγιστοποίηση – ελαχιστοποίησή τους. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό, ότι τα βάρη θα μπου με την μορφή αθροισμάτων και όχι ως μεμονωμένες τιμές. Αυτή η ιδιομορφία της UTASTAR, σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους UTA οφείλεται στην διακριτοποιημένη μορφή στην οποία σχηματίσαμε τα πεδία τιμών των κριτηρίων.

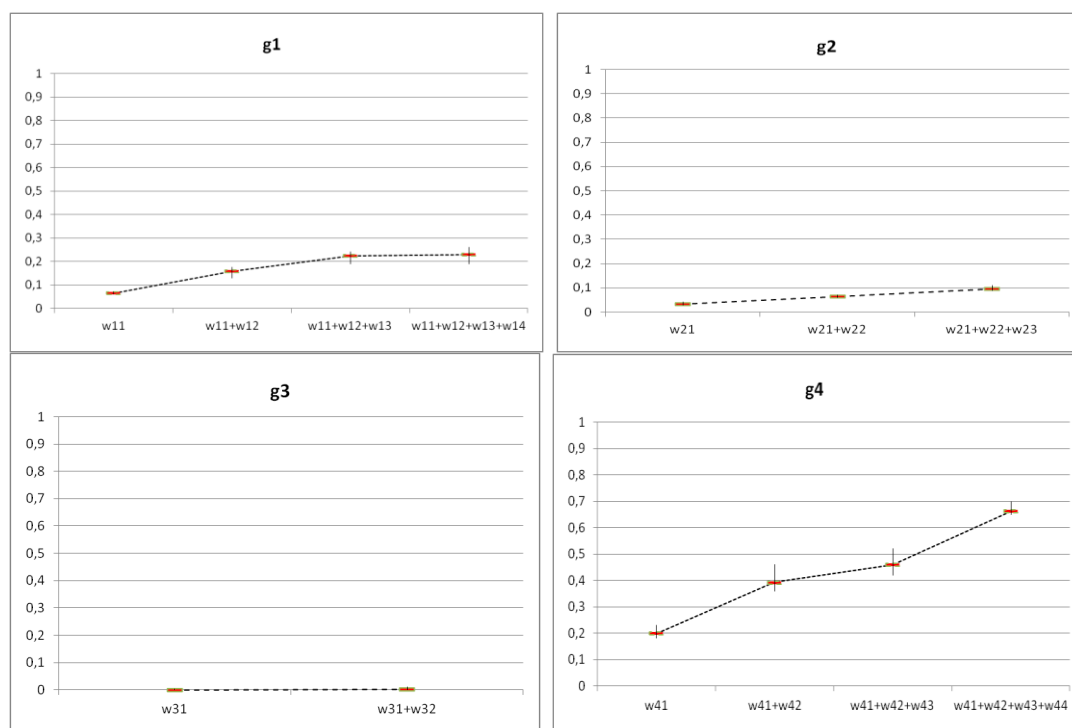
Συμφώνα με το τέταρτο βήμα του αλγορίθμου UTASTAR ο αναλυτής αναζητά $2(4+3+2+4)=26$ λύσεις μεγιστοποιώντας και ελαχιστοποιώντας την συνάρτηση αυτή και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα Π.7 του παραρτήματος.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα τα εύρη των βαρών των 4 κριτηρίων, όπου $W1=w_{11}+w_{12}+w_{13}+w_{14}$ κ.ο.κ.. Η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την μέση τιμή όλων των τρεξιμάτων.



Σχήμα 5.5: Εύρη βαρών για 14 εικονικές δράσεις

Στο Σχήμα 5.6 φαίνονται τις περιθώριες συναρτήσεις για τα τέσσερα κριτήρια όπως διαμορφώθηκαν για τα δεδομένα των 14 εικονικών δράσεων.



Σχήμα 5.6: Περιθώριες συναρτήσεις κριτηρίων για 14 εικονικές δράσεις

Εκτίμηση ευστάθειας

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό ότι τα εύρη των βαρών έχουν περιοριστεί σε σημαντικό βαθμό σε σχέση με τις προηγούμενες φάσεις, το οποίο μας προσφέρει μια σταθερή βάση για την εξαγωγή ενός αξιόπιστου αντιπροσωπευτικού μοντέλου.

Η βελτίωση αυτή φαίνεται και στον δείκτη ASI οποίος παίρνει την τιμή 0.95 από την τιμή 0,64 που είχε στην προηγούμενη φάση. Παρατηρούμε ότι ο δείκτης ASI τώρα πλησιάζει τη μονάδα, γεγονός που υποδεικνύει την ευρωστία του δοκιμαζόμενου μοντέλου.

5.2.4 Εφαρμογή σε αληθινά δεδομένα

Γνωρίζοντας τις περιθώριες συναρτήσεις των κριτηρίων, μπορούν να υπολογιστούν οι αξίες των πραγματικών δράσεων μέσω τις γραμμικής παρεμβολής ώστε να προκύψει η τελική κατάταξη των εικονικών δράσεων. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι αξίες $u(g)$ κάθε δράσης δεδομένων των τελικών βαρών W_i των κριτηρίων.

Η τελική κατάταξη μετά την εφαρμογή του μοντέλου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Κατάταξη	Συστήματα	Αξία
1	P4	0.9550
2	P3	0.9351
3	P2	0.7397
4	P6	0.6168
5	P5	0.5800
6	P1	0.3723

Πίνακας 5.9: Κατάταξη εναλλακτικών συστημάτων



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

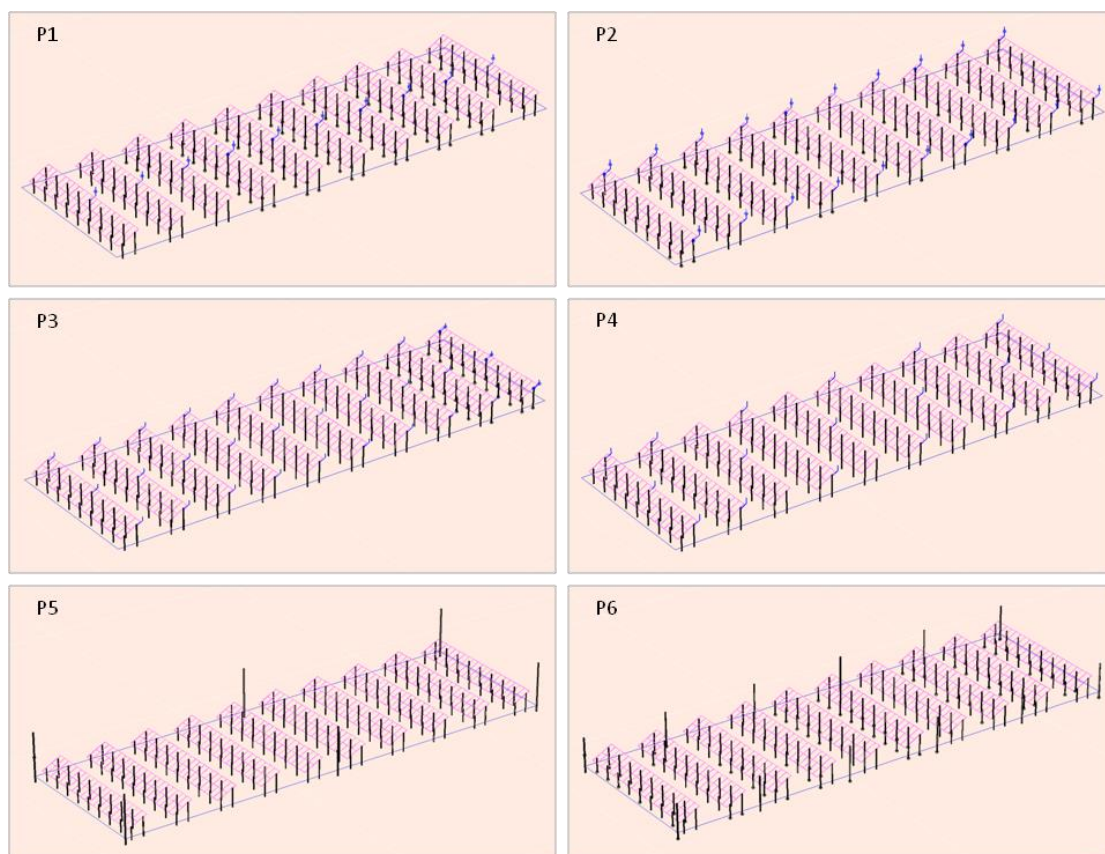
Στην παρούσα εργασία μελετάται η αξιολόγηση εναλλακτικών εξωτερικών συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (Εικόνα 6.1) σύμφωνα με τη πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων και την σύγκριση των μεθόδων PROMETHEE II και UTASTAR. Κάθε εναλλακτικό σύστημα αξιολογείται σύμφωνα με ένα σύνολο κριτηρίων αξιολόγησης που επιλέγονται από τον αποφασίζοντα και τον αναλυτή με αποτέλεσμα να προκύπτει μια εξατομικευμένη αξιολόγηση. Η προτεινόμενη προσέγγιση επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση των κοινών και βελτιστοποιημένων συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά, τεχνικά και κριτήρια ασφάλειας που φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

Κριτήριο	Περιγραφή
g₁	Κόστος εγκατάστασης (€) (κόστος αγοράς, μεταφοράς και εγκατάστασης εξοπλισμού),(ποσοτικό)
g₂	Δυσκολία εγκατάστασης (αδιάστατο) (χρόνος και ανθρώπινο δυναμικό που απαιτείται για την εγκατάσταση του συστήματος),(ποιοτικό)
g₃	Αναμενόμενα κεραυνικά πλήγματα στην εγκατάσταση (πλήγματα/ έτος*10⁻³) , (κεραυνικά πλήγματα σύμφωνα με τη γεωγραφική θέση της εγκατάστασης, το ύψος των κτισμάτων ή φυσικών στοιχείων πλησίον της εγκατάστασης και το ύψος των ακίδων που χρησιμοποιείται), (υπολογίζεται από το λογισμικό πακέτο WinIGS ως αποτέλεσμα προσομοίωσης κεραυνικών πληγμάτων στο κάθε εναλλακτικό σύστημα),(ποσοτικό)
g₄	Ποσοστό κεραυνών που μπορεί να πλήξει τα ΦΒ κύτταρα (%) (δεδομένης της τιμή του κριτηρίου g ₃ υπολογίζεται από το λογισμικό πακέτο WinIGS ο αριθμός των κεραυνών που πλήττει τα ΦΒ κύτταρα και εξαγάγεται το ποσοστό προστασίας),(ποσοτικό)

Πίνακας 6.1: Κριτήρια αξιολόγησης

Οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις αποτελούμενες από τα παρακάτω χαρακτηριστικά, φαίνονται στην Εικόνα 6.2 και οι τιμές αυτών στον Πίνακα 6.2:

- P1: Μη-απομονωμένο σύστημα (1 ακίδα ανά ζευγάρι συστοιχιών προσαρτημένες στο μέσο)
- P2: Μη-απομονωμένο σύστημα (2 ακίδες ανά ζευγάρι συστοιχιών προσαρτημένες στα άκρα)
- P3: Μη-απομονωμένο σύστημα (3 ακίδες ανά ζευγάρι συστοιχιών προσαρτημένες στα άκρα και το μέσο)
- P4: Μη-απομονωμένο σύστημα (3 ακίδες προσαρτώνται στη νοτιότερη και βορειότερη συστοιχία ενώ στις ενδιάμεσες 1 ή 2 ακίδες εναλλάξ)
- P5: Απομονωμένο σύστημα (6 ακίδες τοποθετημένες περιμετρικά στο πάρκο)
- P6: Απομονωμένο σύστημα (12 ακίδες τοποθετημένες περιμετρικά στο πάρκο)



Εικόνα 6.1. Εναλλακτικά συστήματα αντικεραυνικής προστασίας

Δράσεις	Κριτήρια			
	g ₁ (€)	g ₂	g ₃ (*10 ⁻³)	g ₄ (%)
P1	152,20	Χαμηλή(2)	19,03	41,4
P2	304,4	Μέτρια(3)	19,31	6,4
P3	456,6	Μέτρια(2)	19,33	0
P4	228,3	Χαμηλή(2)	19,32	0,73
P5	563,04	Πολύ υψηλή(5)	21,70	14
P6	1126,1	Πολύ υψηλή(5)	22,12	1,5

Πίνακας 6.2: Τιμές κριτηρίων εναλλακτικών συστημάτων

Το σύστημα P4 που αποτελείται από συνολικά 18 μη απομονωμένες ακίδες, κατέληξε να είναι η βέλτιστη λύση για την εξεταζόμενη εγκατάσταση και με τις δύο μεθόδους. Επιπλέον, κρίθηκε χρήσιμη η ανάλυση ευστάθειας στη αναλυτική μέθοδο UTASTAR των αποτελεσμάτων ώστε να επισημανθούν οι διαφοροποιήσεις της τελικής κατάταξης. Η ανάλυση ευστάθειας έγινε με χρήση του δείκτη ASI (Δείκτης Τυπικής Απόκλισης).

Στον Πίνακα 6.3 φαίνονται τα αποτελέσματα της κατάταξης των δύο μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν.

Κατάταξη	PROMETHEE II	UTASTAR
1	P4	P4
2	P3	P3
3	P2	P2
4	P1	P6
5	P6	P5
6	P5	P1

Πίνακας 6.3 Σύγκριση τελικών κατατάξεων

Οι τιμές των βαρών (για την εφαρμογή της PROMETHEE II), μπορούν να λάβουν διαφορετικές τιμές, ανάλογα με την μέθοδο υπολογισμού βαρών. Το κριτήριο g₁ (κόστος) έχει μεγαλύτερο ποσοστό με την μέθοδο ROC (Rank Order Centroid), σε σχέση με αυτό που δίνει η UTASTAR. Γι' αυτό και το σύστημα P1, έχει διαφορετική θέση στην κατάταξη στις 2 μεθόδους. Σε αντίθεση, η UTASTAR από τη φύση της οδηγεί στην ανάλυση της ευστάθειας, και κατά την διάρκεια των επαναλήψεων διαπιστώνεται ότι είναι αρκετά πιο σημαντικό το κριτήριο ασφαλείας σε σχέση με αυτό του κόστους.

Συνοπτικά, τα κύρια συμπεράσματα από την σύγκριση των μεθόδων PROMETHEE II και UTASTAR είναι τα εξής:

- Παρουσιάζουν και οι δύο μέθοδοι αξιοπιστία, καθώς προκύπτει το ίδιο βέλτιστο αποτέλεσμα και παρόμοια κατάταξη (υπάρχει διαφοροποίηση από την τέταρτη θέση και κάτω).
- Οι τιμές των βαρών των κριτηρίων διαφέρουν στις δύο μεθόδους λόγω διαφορετικής προσέγγισης υπολογισμού αυτών.
- Η UTASTAR καθώς έχει στη μεθοδολογία της, την min-max προσέγγιση μέσω γραμμικού προγραμματισμού, οδηγεί στον υπολογισμό της ευστάθειας αν παρατηρηθεί μεγάλο εύρος στις τιμές των βαρών.
- Αν υπήρχε μεγαλύτερος αριθμός κριτηρίων, θα ήταν προτιμότερη η μέθοδος UTASTAR, καθώς διευκολύνει την αποτύπωση των προτιμήσεων του αποφασίζοντα λόγω της πολυπλοκότητας της.

Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Όπως διαπιστώθηκε, το κύριο πρόβλημα στην πολυκριτήρια ανάλυση, είναι ο υπολογισμός των βαρών. Το μεγάλο εύρος πιθανών τιμών στα βάρη μπορεί να φέρει αλλοιώσεις στην τελική κατάταξη. Έτσι τίθεται το ζήτημα για την αναγκαιότητα της ανάλυσης της ευστάθειας. Ωστόσο στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο (P4 βέλτιστο) και στις δύο μεθόδους. Σε διαφορετικού είδους προβλήματα όπου ο αναλυτής θα επιλέξει την μέθοδο PROMETHEE II, θα ήταν καταλληλότερη μια μέθοδος επιλογής βαρών όπως η Robust Simos (Siskos E., Tsotsolas N., 2015), η οποία αξιολογεί την ευστάθεια των βαρών.

Επίσης για να μπορέσουμε να έχουμε μια καλύτερη αξιολόγηση των μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης, προτείνεται το συγκεκριμένο πρόβλημα να αξιολογηθεί και με άλλες μεθόδους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σίσκος, Ι. (2008). *Μοντέλα Αποφάσεων. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών*
2. C.A. Christodoulou, V.T. Kontargyri, K. Damianaki, A.C. Kyritsis, I.F. Gonos and N.P. Papanikolaou, 2015, Lightning performance study for photovoltaic systems, *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilsen, Czech Republic
3. Photovoltaic power systems programme, 2015, *Snapshot of global photovoltaic markets*, International Energy Agency
4. Siskos E., Tsotsolas N., 2015, *Elicitation of criteria importance weights through the Simos method: A robustness concern*, European Journal of Operational Research 246, pp. 243-253.
5. Δανάη Δ. Δαμιανάκη, Αξιολόγηση Συστημάτων Αντικεραυνικής Προστασίας σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα με τη χρήση Πολυκριτήριας Ανάλυσης, Πτυχιακή εργασία, Πειραιάς 2016
6. Ελευθέριος Ι. Σίσκος, Ευσταθής Αξιολόγηση της Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης στην Ευρώπη μέσω Πολυκριτηριακής Μεθοδολογίας Υποστήριξης Αποφάσεων, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2018
8. Bertrand Mareschal, Preference functions and thresholds, June 14, 2018
9. Klement K., “DC Arc Flash Studies for Solar Photovoltaic Systems: Challenges and Recommendations”, *IEEE Trans. on Industry Applications* 51 (5), pp. 4239-4244, 2015.
10. Hua Yang, Xing Liu, “Design of PV charge and discharge controller in insulator monitoring system”, *2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, Deng Feng, China, pp. 2039-2042, 8-10 August 2011.
11. Hernández J., Vidal P., Francisco J., “Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations”, *IEEE Trans on PWRD* 23(4), pp. 1961-1971, 2008.
12. IEC Std 62305-2: “Protection against lightning Part 2: Risk management” 2006.

13. *IEC Std 62305-1*: “Protection against lightning Part 1: General principles” 2006.
14. *IEC Std 62305-3*: “Protection against lightning Part 3: Physical damage to structures and life hazard” 2006.
15. Fallah N., Gomes C., Kadir M.Z.A.A., Nourirad G., Baojahmadi M., Ahmed R.J., “Lightning Protection Techniques for Roof-Top PV Systems” *7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2013)*, Langkawi, Malaysia, 3-4 June 2013.
16. Ittarat S., Hiranvarodom S., Plangklang B., “A Computer Program for Evaluating the Risk of Lightning Impact and for Designing the Installation of Lightning Rod Protection for Photovoltaic System”, *Energy Procedia*, (*10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium* 5-8 December 2012, Muang, Ubon-ratchathani, Thailand) (34), pp. 318–325, 2013.
17. International Energy Agency Implementing Agreement on Photovoltaic Power Systems, *Report IEA PVPS T3-14*: “Common practices for protection against the effects of lightning on stand-alone photovoltaic systems”, 2003.
18. Charalambous C., Kokkinos N., Christofides N., “External Lightning Protection and Grounding in Large-Scale Photovoltaic Applications”, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility* 56 (2), pp. 427-434, 2014.
19. *IEC Std. 61643-12*: “LV Surge Protective Devices—Part 12: Surge Protective Devices Connected to LV Power Distribution Systems—Selection and Application Principles”, 2012.
20. *ABB*: OVR Practical guide for the protection against surges, 2014.
21. *IEC Std 62305-4*: “Protection against lightning Part 4: Electrical and electronic systems within structures”, 2006.
22. Πρότυπο ΕΛΟΤ 1197
23. Παύλος Ν. Νικολαΐδης, ‘Αντικεραυνική προστασία φωτοβολταϊκών συστημάτων’, Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2012

24. Charalambos A. Charalambous, Nikolaos D. Kokkinos, Nikolas Christofides, 'External Lightning Protection and Grounding in Large-Scale Photovoltaic Applications', IEEE Transactions on Electromagnetic Combatibility, Vol. 56, no. 2, 2014
25. Ιωάννης Γ. Κουρούσιος, 'Ανάλυση και οπτικοποίηση της ευστάθειας στην πολυκριτήρια αξιολόγηση της ηλεκτρονικής διακυβέρνησης', Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2015
26. Byeong Seok Ahn, Compatible weighting method with rank order centroid: Maximum entropy ordered weighted averaging approach, *European Journal of Operational Research* Pages 552-559, August 2011

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π.1 Υπολογισμός αποστάσεων PROMETHEE II

Αποστάσεις	g1	g2	g3	g4
d(P1,P2)	-152.2	-1	-0.28	35
d(P1,P3)	-304.4	-1	-0.3	41.4
d(P1,P4)	-76.1	0	-0.29	40.67
d(P1,P5)	-410.84	-3	-2.67	27.4
d(P1,P6)	-973.9	-3	-3.09	39.9
d(P2,P1)	152.2	1	0.28	-35
d(P2,P3)	-152.2	0	-0.02	6.4
d(P2,P4)	76.1	1	-0.01	5.67
d(P2,P5)	-258.64	-2	-2.39	-7.6
d(P2,P6)	-821.7	-2	-2.81	4.9
d(P3,P1)	304.4	1	0.3	-41.4
d(P3,P2)	152.2	0	0.02	-6.4
d(P3,P4)	228.3	1	0.01	-0.73
d(P3,P5)	-106.44	-2	-2.37	-14
d(P3,P6)	-669.5	-2	-2.79	-1.5
d(P4,P1)	76.1	0	0.29	-40.67
d(P4,P2)	-76.1	-1	0.01	-5.67
d(P4,P3)	-228.3	-1	-0.01	0.73
d(P4,P5)	-334.74	-3	-2.38	-13.27
d(P4,P6)	-897.8	-3	-2.8	-0.77
d(P5,P1)	410.84	3	2.67	-27.4
d(P5,P2)	258.64	2	2.39	7.6
d(P5,P3)	106.44	2	2.37	14
d(P5,P4)	334.74	3	2.38	13.27
d(P5,P6)	-563.06	0	-0.42	12.5
d(P6,P1)	973.9	3	3.09	-39.9
d(P6,P2)	821.7	2	2.81	-4.9
d(P6,P3)	669.5	2	2.79	1.5
d(P6,P4)	897.8	3	2.8	0.77
d(P6,P5)	563.06	0	0.42	-12.5

Πίνακας Π.2 Υπολογισμός συναρτήσεων προτίμησης PROMETHEE II

Συναρτήσεις Προτίμησης	g1	g2	g3	g4
P(P1,P2)	1	1	1	0
P(P1,P3)	1	1	1	0
P(P1,P4)	1	0	1	0
P(P1,P5)	1	1	1	0
P(P1,P6)	1	1	1	0
P(P2,P1)	0	0	0	1
P(P2,P3)	1	0	1	0
P(P2,P4)	0	0	1	0
P(P2,P5)	1	1	1	1
P(P2,P6)	1	1	1	0
P(P3,P1)	0	0	0	1
P(P3,P2)	0	0	0	1
P(P3,P4)	0	0	0	0
P(P3,P5)	1	1	1	1
P(P3,P6)	1	1	1	0.17
P(P4,P1)	0	0	0	1
P(P4,P2)	1	1	0	1
P(P4,P3)	1	1	1	0
P(P4,P5)	1	1	1	1
P(P4,P6)	1	1	1	0
P(P5,P1)	0	0	0	1
P(P5,P2)	0	0	0	0
P(P5,P3)	0	0	0	0
P(P5,P4)	0	0	0	0
P(P5,P6)	1	0	1	0
P(P6,P1)	0	0	0	1
P(P6,P2)	0	0	0	1
P(P6,P3)	0	0	0	0
P(P6,P4)	0	0	0	0
P(P6,P5)	0	0	0	1

Πίνακας Π.3 Υπολογισμός w*P PROMETHEE II

w*P	g1	g2	g3	g4
w*P(P1,P2)	0.27	0.15	0.06	0
w*P(P1,P3)	0.27	0.15	0.06	0
w*P(P1,P4)	0.27	0	0.06	0
w*P(P1,P5)	0.27	0.15	0.06	0
w*P(P1,P6)	0.27	0.15	0.06	0
w*P(P2,P1)	0	0	0	0.52
w*P(P2,P3)	0.27	0	0.06	0
w*P(P2,P4)	0	0	0.06	0
w*P(P2,P5)	0.27	0.15	0.06	0.52
w*P(P2,P6)	0.27	0.15	0.06	0
w*P(P3,P1)	0	0	0	0.52
w*P(P3,P2)	0	0	0	0.52
w*P(P3,P4)	0	0	0	0
w*P(P3,P5)	0.27	0.15	0.06	0.52
w*P(P3,P6)	0.27	0.15	0.06	0.09
w*P(P4,P1)	0	0	0	0.52
w*P(P4,P2)	0.27	0.15	0	0.52
w*P(P4,P3)	0.27	0.15	0.06	0
w*P(P4,P5)	0.27	0.15	0.06	0.52
w*P(P4,P6)	0.27	0.15	0.06	0
w*P(P5,P1)	0	0	0	0.52
w*P(P5,P2)	0	0	0	0
w*P(P5,P3)	0	0	0	0
w*P(P5,P4)	0	0	0	0
w*P(P5,P6)	0.27	0	0.06	0
w*P(P6,P1)	0	0	0	0.52
w*P(P6,P2)	0	0	0	0.52
w*P(P6,P3)	0	0	0	0
w*P(P6,P4)	0	0	0	0
w*P(P6,P5)	0	0	0	0.52

Πίνακας Π.4 Σταθμισμένος δείκτης προτίμησης PROMETHEE II

$\pi(P1,P2)$	0.48
$\pi(P1,P3)$	0.48
$\pi(P1,P4)$	0.33
$\pi(P1,P5)$	0.48
$\pi(P1,P6)$	0.48
$\pi(P2,P1)$	0.52
$\pi(P2,P3)$	0.33
$\pi(P2,P4)$	0.06
$\pi(P2,P5)$	1
$\pi(P2,P6)$	0.48
$\pi(P3,P1)$	0.52
$\pi(P3,P2)$	0.52
$\pi(P3,P4)$	0
$\pi(P3,P5)$	1
$\pi(P3,P6)$	0.57
$\pi(P4,P1)$	0.52
$\pi(P4,P2)$	0.94
$\pi(P4,P3)$	0.48
$\pi(P4,P5)$	1
$\pi(P4,P6)$	0.48
$\pi(P5,P1)$	0.52
$\pi(P5,P2)$	0
$\pi(P5,P3)$	0
$\pi(P5,P4)$	0
$\pi(P5,P6)$	0.33
$\pi(P6,P1)$	0.52
$\pi(P6,P2)$	0.52
$\pi(P6,P3)$	0
$\pi(P6,P4)$	0
$\pi(P6,P5)$	0.52

Πίνακας Π.5: Πίνακας αποτελεσμάτων για 8 εικονικές δράσεις

Type of solution	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₂₁	W ₂₂	W ₂₃	W ₃₁	W ₃₂	W ₄₁	W ₄₂	W ₄₃	W ₄₄
min w ₁₁	0,03	0,283	0	0	0	0,253	0,03	0	0	0	0,313	0,09	0
max w ₁₁	0,395	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,06	0,455	0
Min w ₁₁ + w ₁₂	0,045	0	0,253	0	0	0	0,03	0	0,015	0,045	0,283	0,328	0
Max w ₁₁ + w ₁₂	0,395	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,06	0,455	0
Min w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃	0,03	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,06	0,82	0
Max w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃	0,365	0	0,06	0	0	0,03	0,03	0	0	0	0,09	0,425	0
Min w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃ + w ₁₄	0,03	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,06	0,82	0
Max w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃ + w ₁₄	0,182	0	0,152	0,092	0	0,122	0,03	0	0	0	0,182	0,242	0
Min w ₂₁	0,142	0,172	0	0	0	0,142	0,142	0,112	0	0	0,202	0,09	0
Max w ₂₁	0,152	0,03	0	0	0,243	0	0,03	0	0,122	0,152	0,06	0,212	0
Min w ₂₁ + w ₂₂	0,2125	0,03	0	0	0	0	0,2125	0,1825	0	0,2125	0,06	0,09	0
Max w ₂₁ + w ₂₂	0,11375	0,14375	0	0	0,1675	0,11375	0,03	0	0,08375	0	0,17375	0,17375	0
Min w ₂₁ + w ₂₂ + w ₂₃	0,2125	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0,1825	0,2125	0,06	0,2725	0
Max w ₂₁ + w ₂₂ + w ₂₃	0,125	0,155	0	0	0	0,125	0,221	0,095	0	0	0,185	0,09	0
Min w ₃₁	0,142	0,172	0	0	0	0,142	0,03	0	0,112	0	0,202	0,202	0
Max w ₃₁	0,2125	0,03	0	0	0	0	0,2125	0,1825	0	0,2125	0,06	0,09	0
Min w ₃₁ + w ₃₂	0,03	0,283	0	0	0	0,253	0,03	0	0	0	0,313	0,09	0
Max w ₃₁ + w ₃₂	0,2125	0,03	0	0	0	0	0,2125	0,1825	0	0,2125	0,06	0,09	0
Min w ₄₁	0,142	0,172	0	0	0	0,142	0,142	0,112	0	0	0,202	0,09	0
Max w ₄₁	0,03	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,76	0,06	0,09	0
Min w ₄₁ + w ₄₂	0,395	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,06	0,455	0
Max w ₄₁ + w ₄₂	0,03	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,79	0,09	0
Min w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃	0,395	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,06	0	0,455
Max w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃	0,03	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,79	0,09	0
Min w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃ + w ₄₄	0,125	0,155	0	0	0	0,125	0,221	0,095	0	0	0,185	0,09	0
Max w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃ + w ₄₄	0,03	0,03	0	0	0	0	0,03	0	0	0,03	0,06	0,82	0
Βαρόκεντρο	0,162	0,076	0,018	0,004	0,016	0,056	0,074	0,037	0,019	0,079	0,18	0,26	0,016

Πίνακας Π6: Πίνακας αποτελεσμάτων για 11 εικονικές δράσεις

Type of solution	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₂₁	W ₂₂	W ₂₃	W ₃₁	W ₃₂	W ₄₁	W ₄₂	W ₄₃	W ₄₄
min w ₁₁	0,06	0,13	0,1	0	0,07	0,03	0,03	0	0	0	0,26	0,1	0,22
max w ₁₁	0,335	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,09	0,03	0,395
Min w ₁₁ + w ₁₂	0,06	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,09	0,58	0,12
Max w ₁₁ + w ₁₂	0,335	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,09	0,03	0,395
Min w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃	0,06	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,09	0,03	0,67
Max w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃	0,335	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,09	0,03	0,395
Min w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃ + w ₁₄	0,06	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,09	0,03	0,67
Max w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃ + w ₁₄	0,335	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,09	0,03	0,395
Min w ₂₁	0,152	0,03	0,122	0	0	0,122	0,122	0,092	0,03	0	0,182	0,03	0,12
Max w ₂₁	0,168	0	0,108	0	0,078	0,03	0,03	0	0,138	0	0,138	0,108	0,198
Min w ₂₁ + w ₂₂	0,243	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,213	0	0,09	0,03	0,303
Max w ₂₁ + w ₂₂	0,152	0,03	0,122	0	0	0,122	0,03	0	0,122	0	0,182	0,03	0,212
Min w ₂₁ + w ₂₂ + w ₂₃	0,243	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,213	0	0,09	0,03	0,303
Max w ₂₁ + w ₂₂ + w ₂₃	0,152	0,03	0,122	0	0	0,122	0,122	0,092	0,03	0	0,182	0,03	0,12
Min w ₃₁	0,243	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,213	0	0,09	0,03	0,303
Max w ₃₁	0,152	0,03	0,122	0	0	0,122	0,122	0,092	0,03	0	0,182	0,03	0,12
Min w ₃₁ + w ₃₂	0,305	0,06	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0	0	0,12	0,03	0,395
Max w ₃₁ + w ₃₂	0,243	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,213	0	0,09	0,03	0,303
Min w ₄₁	0,152	0,03	0,122	0	0	0,122	0,122	0,092	0,03	0	0,182	0,03	0,12
Max w ₄₁	0,06	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0,55	0,09	0,03	0,12
Min w ₄₁ + w ₄₂	0,243	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,213	0	0,03	0,03	0,303
Max w ₄₁ + w ₄₂	0,06	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,64	0,03	0,12
Min w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃	0,243	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,213	0	0,09	0,03	0,303
Max w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃	0,06	0,03	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0,03	0	0,09	0,58	0,12
Min w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃ + w ₄₄	0,152	0,03	0,122	0	0	0,122	0,122	0,092	0,03	0	0,182	0,03	0,12
Max w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃ + w ₄₄	0,06	0,06	0,03	0	0	0,03	0,03	0	0	0	0,12	0,03	0,64
Βαρόκεντρο	0,179	0,035	0,057	0	0,006	0,051	0,048	0,018	0,076	0,021	0,140	0,078	0,289

Πίνακας Π.7: Πίνακας αποτελεσμάτων για 14 εικονικές δράσεις

Type of solution	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₂₁	W ₂₂	W ₂₃	W ₃₁	W ₃₂	W ₄₁	W ₄₂	W ₄₃	W ₄₄
min w ₁₁	0,06	0,115	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,205	0,205	0,06	0,205
max w ₁₁	0,071	0,09	0,071	0	0,041	0,03	0,03	0	0,011	0,202	0,191	0,071	0,191
Min w ₁₁ + w ₁₂	0,06	0,09	0,06	0,05	0,03	0,03	0,03	0	0	0,23	0,18	0,06	0,18
Max w ₁₁ + w ₁₂	0,06	0,115	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,205	0,205	0,06	0,205
Min w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃	0,06	0,09	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,18	0,18	0,06	0,28
Max w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃	0,07	0,1	0,07	0	0,03	0,04	0,03	0	0	0,2	0,2	0,06	0,2
Min w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃ + w ₁₄	0,06	0,09	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,18	0,18	0,06	0,28
Max w ₁₁ + w ₁₂ + w ₁₃ + w ₁₄	0,06	0,09	0,06	0,05	0,03	0,03	0,03	0	0	0,23	0,18	0,06	0,18
Min w ₂₁	0,07	0,1	0,07	0	0,03	0,04	0,03	0	0	0,2	0,2	0,06	0,2
Max w ₂₁	0,071	0,09	0,071	0	0,041	0,03	0,03	0	0,011	0,202	0,191	0,071	0,191
Min w ₂₁ + w ₂₂	0,06	0,115	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,205	0,205	0,06	0,205
Max w ₂₁ + w ₂₂	0,071	0,09	0,071	0	0,041	0,03	0,03	0	0,011	0,202	0,191	0,071	0,191
Min w ₂₁ + w ₂₂ + w ₂₃	0,06	0,115	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,205	0,205	0,06	0,205
Max w ₂₁ + w ₂₂ + w ₂₃	0,07	0,09	0,07	0	0,04	0,03	0,04	0	0,01	0,2	0,19	0,07	0,19
Min w ₃₁	0,071	0,09	0,071	0	0,041	0,03	0,03	0	0,011	0,202	0,191	0,071	0,191
Max w ₃₁	0,07	0,096	0,07	0	0,033	0,036	0,033	0,003	0	0,2	0,197	0,063	0,193
Min w ₃₁ + w ₃₂	0,07	0,1	0,07	0	0,03	0,04	0,03	0	0	0,2	0,2	0,06	0,2
Max w ₃₁ + w ₃₂	0,071	0,09	0,071	0	0,041	0,03	0,03	0	0,011	0,202	0,191	0,07	0,191
Min w ₄₁	0,06	0,09	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,18	0,18	0,06	0,028
Max w ₄₁	0,06	0,09	0,06	0,05	0,03	0,03	0,03	0	0	0,23	0,18	0,06	0,18
Min w ₄₁ + w ₄₂	0,06	0,09	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,18	0,18	0,06	0,28
Max w ₄₁ + w ₄₂	0,06	0,09	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,18	0,28	0,06	0,18
Min w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃	0,06	0,09	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,18	0,18	0,06	0,28
Max w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃	0,06	0,09	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,18	0,18	0,16	0,18
Min w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃ + w ₄₄	0,07	0,09	0,07	0	0,04	0,03	0,04	0	0,01	0,2	0,19	0,07	0,19
Max w ₄₁ + w ₄₂ + w ₄₃ + w ₄₄	0,06	0,07	0,06	0	0,03	0,03	0,03	0	0	0,18	0,18	0,06	0,28
Βαρύκεντρο	0,06442	0,09446	0,06442	0,00577	0,033	0,03138	0,03088	0,00012	0,00288	0,19846	0,19354	0,06680	0,20292