



**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ  
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»**

Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση και Επιλογή Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών με τη Χρήση  
Πολυκριτηριακής Ανάλυσης

Μουλουδάκης Βασίλης

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Αρετούλης

Πάτρα, Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μουλουδάκη Βασίλη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Αξιολόγηση και Επιλογή Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών με τη Χρήση Πολυκριτηριακής  
Ανάλυσης

Μουλουδάκης Βασίλης

Πάτρα, Μάιος 2026

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Γεώργιος Αρετούλης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Κουλουριώτης

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ

Καθηγητής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

«Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στο μικρό μου Γιωργάκη».

«Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Αρετούλη ο οποίος δέχτηκε με χαρά να αναλάβει την επίβλεψη της παρούσας και παρείχε εξαιρετική καθοδήγηση κατά τη διάρκεια εκπόνησής της»

## Πίνακας περιεχομένων

|       |                                                                                                                               |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή .....                                                                                                   | 17 |
| 1.1   | Περίληψη.....                                                                                                                 | 17 |
| 1.2   | . Μεθοδολογία ανάλυσης.....                                                                                                   | 17 |
| 1.3   | . Δομή εργασίας .....                                                                                                         | 19 |
| 2     | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Νομικό πλαίσιο για τη χωροθέτηση των φωτοβολταϊκών σταθμών στην Ελλάδα .....                                     | 20 |
| 2.1   | Εισαγωγή.....                                                                                                                 | 20 |
| 2.2   | Ισχύον θεσμικό πλαίσιο για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών .....                                                                  | 21 |
| 2.3   | Βασικές ρυθμίσεις του νέου Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών .....                         | 22 |
| 2.4   | Συμπεράσματα .....                                                                                                            | 24 |
| 3     | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Θεωρητικά στοιχεία για τις ΑΠΕ .....                                                                             | 26 |
| 3.1   | Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια , βιομάζα, υδροηλεκτρική ενέργεια, γεωθερμική ενέργεια). ..... | 26 |
| 3.1.1 | Εισαγωγικά .....                                                                                                              | 26 |
| 3.1.2 | Επιστημονική έρευνα και διεθνείς τάσεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας..                                                    | 26 |
| 3.1.3 | Κατηγορίες και τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....                                                                   | 28 |
| 3.1.4 | Αποθήκευση ενέργειας, έξυπνα δίκτυα και ενσωμάτωση ΑΠΕ.....                                                                   | 31 |
| 3.1.5 | Συμπεράσματα και σύνδεση με τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών .....                                                                 | 32 |
| 3.2   | Φωτοβολταϊκή τεχνολογία .....                                                                                                 | 32 |
| 3.2.1 | Γενική θεώρηση και αρχές λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων.....                                                            | 32 |
| 3.2.2 | Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και φυσική λειτουργία των κυψελών .....                                                                | 32 |
| 3.2.3 | Φωτοβολταϊκά πάνελ και τεχνολογικές κατηγορίες.....                                                                           | 34 |
| 3.2.4 | Δομή φωτοβολταϊκών συστημάτων και πραγματική ενεργειακή απόδοση .....                                                         | 35 |
| 3.2.5 | Βελτιστοποίηση λειτουργίας, ψηφιακές τεχνολογίες και βιωσιμότητα.....                                                         | 36 |
| 4     | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Πολυκριτηριακή Ανάλυση και Μέθοδος Promethee .....                                                               | 38 |
| 4.1   | Πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων.....                                                                                         | 38 |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.1. Γενικά στοιχεία .....                                                 | 38  |
| 4.1.2. Μέθοδοι Πολυκριτηριακής Ανάλυση Αποφάσεων .....                       | 44  |
| 4.2. Η μέθοδος Promethee .....                                               | 48  |
| 4.2.1 Γενικά στοιχεία .....                                                  | 48  |
| 4.2.2 Βασικά βήματα εφαρμογής της μεθόδου PROMETHEE.....                     | 49  |
| 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Βιβλιογραφική επισκόπηση της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων |     |
| 58                                                                           |     |
| 5.1 Εισαγωγή.....                                                            | 58  |
| 5.2 Ερευνητικές τάσεις και μεθοδολογίες.....                                 | 59  |
| 5.3 Κριτήρια χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων .....                          | 60  |
| 5.4 Επισκόπηση επιλεγμένων ερευνητικών εφαρμογών.....                        | 63  |
| 5.5 Συμπεράσματα .....                                                       | 71  |
| 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE στην αξιολόγηση της          |     |
| χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων με βάση μετεωρολογικά κριτήρια.....         | 73  |
| 6.1 Διατύπωση προβλήματος.....                                               | 73  |
| 6.2. Περιγραφή του ελληνικού κλίματος .....                                  | 74  |
| 6.3. Πηγές δεδομένων .....                                                   | 76  |
| 6.3.1. Μετεωρολογικοί σταθμοί της ΕΜΥ .....                                  | 76  |
| 6.3.2. Χάρτες ηλιακών πόρων.....                                             | 76  |
| 6.4 Καθορισμός των εξεταζόμενων θέσεων και περιγραφή των μετεωρολογικών      |     |
| δεδομένων τους.....                                                          | 78  |
| 6.4.1 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου .....           | 78  |
| 6.4.2 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου .....               | 84  |
| 6.4.3 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης.....           | 90  |
| 6.4.4 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου .....           | 96  |
| 6.4.5 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας.....              | 102 |
| 6.4.6 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας .....           | 108 |
| 6.4.7 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς .....           | 114 |

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.5 Καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας .....                                                                                                          | 120 |
| 6.5.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....                                                                                                                           | 120 |
| 6.5.2 Θερμοκρασία .....                                                                                                                                 | 123 |
| 6.5.3 Ηλιοφάνεια / Νεφοκάλυψη .....                                                                                                                     | 125 |
| 6.5.4 Άνεμος .....                                                                                                                                      | 126 |
| 6.5.5 Υγρασία .....                                                                                                                                     | 128 |
| 6.5.6 Θεωρία στατιστικών δεικτών.....                                                                                                                   | 129 |
| 6.5.7. Πρόταση συντελεστών βαρύτητας με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα.....                                                                               | 130 |
| 6.5.8. Συγκριτική παράθεση συντελεστών βαρύτητας της παρούσας εργασίας και της μελέτης των Karadöl & Yildirim (2025) .....                              | 133 |
| 6.6 Εφαρμογή της μεθόδου και παρουσίαση αποτελεσμάτων .....                                                                                             | 135 |
| 6.6.1 Παραδοχές μελέτης.....                                                                                                                            | 135 |
| 6.6.2 Σχετικά με το πρόγραμμα visual promethee .....                                                                                                    | 136 |
| 6.6.3 Επίλυση με συντελεστές βαρύτητας από επεξεργασία της βιβλιογραφίας .....                                                                          | 144 |
| 6.6.4 Επίλυση με συντελεστές βαρύτητας των Karadöl & Yildirim (2025).....                                                                               | 156 |
| 7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - Συμπεράσματα.....                                                                                                                        | 168 |
| 7.1 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα κατάταξης που προκύπτουν από GIS χάρτες δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά. .... | 168 |
| 7.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας .....                                                                                                              | 171 |
| 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....                                                                                                                                    | 173 |

## Πίνακας εικόνων και σχημάτων

|                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1 Εξέλιξη της ερευνητικής δραστηριότητας με αντικείμενο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Πηγή: (García-Lillo , 2023). ....                                                                                                                                         | 27 |
| Εικόνα 2 Παγκόσμιος χάρτης συνεργασιών (Πηγή: (García-Lillo , 2023). ....                                                                                                                                                                                                  | 28 |
| Εικόνα 3 Ένωση p-n σε φωτοβολταϊκό στοιχείο. (Πηγή: (Al-Ezzi, 2022). ....                                                                                                                                                                                                  | 33 |
| Εικόνα 4 Η βασική μορφή του ημιαγωγού τη στιγμή της σύνδεσης των τμημάτων p-n και η δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή φορτίου χώρου. Οι φορείς πλειονότητας σε μία δίοδο ορθής πόλωσης. (Πηγή: (Al-Ezzi, 2022). ....                                           | 34 |
| Εικόνα 5 Η ροή των φορέων πλειονότητας σε δίοδο υπό ορθή πόλωση. (Πηγή: (Al-Ezzi, 2022). ....                                                                                                                                                                              | 34 |
| Εικόνα 6 Τα βασικά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Πηγή: (Al-Ezzi, 2022). ....                                                                                                                                                                                     | 34 |
| Εικόνα 7 Μεθοδολογία αξιολόγησης της απόδοσης για τη σύγκριση δεδομένων πραγματικής μετρούμενης παραγωγής με υπολογιστικά μοντέλα που βασίζονται στην περιγραφή του συστήματος και σε κλιματικά δεδομένα. Εικονογράφηση από τον Andy Walker, NREL (Πηγή: (NREL, 2022) .... | 36 |
| Εικόνα 8 Η διαδικασία λήψης απόφασης (Πηγή: (Bonakdari , 2024). ....                                                                                                                                                                                                       | 41 |
| Εικόνα 9 Απεικόνιση της διαδικασίας πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων. (Πηγή: (Bonakdari , 2024) ....                                                                                                                                                                     | 42 |
| Εικόνα 10 Πίνακας MCDM (Πηγή: (Taherdoost , 2023) ....                                                                                                                                                                                                                     | 43 |
| Εικόνα 11 Ταξινόμηση των αντισταθμιστικών μεθόδων της πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων (MCDM). (Πηγή: (Bonakdari , 2024) ....                                                                                                                                               | 46 |
| Εικόνα 12 Περιγραφή των βασικών μεθόδων MCDM (Πηγή: (Taherdoost , 2023) ....                                                                                                                                                                                               | 47 |
| Εικόνα 13 Διαφορετικοί τύποι σχέσεων προτίμησης. (Πηγή: Bonakdari , 2024) ....                                                                                                                                                                                             | 52 |
| Εικόνα 14 Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου PROMETHEE. (Πηγή: Bonakdari , 2024) ..                                                                                                                                                                                           | 57 |
| Εικόνα 15 Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY) ....                                                                                                                                                                    | 79 |
| Εικόνα 16 Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> , ανάκτηση 16-02-2026) ....                       | 79 |
| Εικόνα 17 Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY) ....                                                                                                                                                                   | 80 |
| Εικόνα 18 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY) ....                                                                                                                                                                    | 80 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 19 Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                          | 80 |
| Εικόνα 20 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                  | 81 |
| Εικόνα 21 Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Τυμπακίου, με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα).....                                                    | 81 |
| Εικόνα 22 Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0) .....                               | 82 |
| Εικόνα 23 Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0)..... | 83 |
| Εικόνα 24 Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                           | 85 |
| Εικόνα 25 Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> ).....                                                                                                   | 85 |
| Εικόνα 26 Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου.(Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                           | 86 |
| Εικόνα 27 Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                              | 86 |
| Εικόνα 28 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                          | 86 |
| Εικόνα 29 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                      | 87 |
| Εικόνα 30 Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Ρόδου , με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα) .....                                                      | 87 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 31 Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0) .....                                    | 88 |
| Εικόνα 32 Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0) .....     | 89 |
| Εικόνα 33 Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                       | 91 |
| Εικόνα 34 Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> ) .....                                                                                              | 91 |
| Εικόνα 35 Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY). .....                                                                                                                                                                                     | 92 |
| Εικόνα 36 Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                          | 92 |
| Εικόνα 37 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                  | 92 |
| Εικόνα 38 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                      | 93 |
| Εικόνα 39 Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Σαντορίνης , με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα).....                                                   | 93 |
| Εικόνα 40 Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0) .....                               | 94 |
| Εικόνα 41 Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0)..... | 95 |
| Εικόνα 42 Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                       | 97 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 43. Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> ) .....                                                                                              | 97  |
| Εικόνα 44. Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY))......                                                                                                                                                                                     | 98  |
| Εικόνα 45. Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                         | 98  |
| Εικόνα 46. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                 | 98  |
| Εικόνα 47. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                      | 99  |
| Εικόνα 48. Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Ηρακλείου , με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα).....                                                   | 99  |
| Εικόνα 49. Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0) .....                               | 100 |
| Εικόνα 50. Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0)..... | 101 |
| Εικόνα 51. Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Λάρισας. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                        | 103 |
| Εικόνα 52. Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> ) .....                                                                                                | 103 |
| Εικόνα 53. Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY). ....                                                                                                                                                                                        | 104 |
| Εικόνα 54. Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                           | 104 |
| Εικόνα 55. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                    | 104 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 56. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                        | 105 |
| Εικόνα 57. Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Λάρισας , με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα) .....                                                  | 105 |
| Εικόνα 58. Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0) .....                               | 106 |
| Εικόνα 59. Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0)..... | 107 |
| Εικόνα 60. Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                    | 109 |
| Εικόνα 61. Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> ) .....                                                                                            | 109 |
| Εικόνα 62. Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY).....                                                                                                                                                                                     | 110 |
| Εικόνα 63. Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                        | 110 |
| Εικόνα 64. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                | 110 |
| Εικόνα 65. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                     | 111 |
| Εικόνα 66. Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Καλαμάτας , με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα) .....                                                | 111 |
| Εικόνα 67. Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0) .....                             | 112 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 68. Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0)..... | 113 |
| Εικόνα 69. Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                      | 115 |
| Εικόνα 70. Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> ).....                                                                                               | 115 |
| Εικόνα 71. Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY)).....                                                                                                                                                                                      | 116 |
| Εικόνα 72. Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: EMY) .....                                                                                                                                                                                                                         | 116 |
| Εικόνα 73. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                   | 116 |
| Εικόνα 74. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς (Πηγή: EMY).....                                                                                                                                                                                                                        | 117 |
| Εικόνα 75. Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Καλαμάτας , με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα).....                                                   | 117 |
| Εικόνα 76. Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0) .....                               | 118 |
| Εικόνα 77. Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> , άδεια CC BY-SA 4.0)..... | 119 |
| Εικόνα 78. Συντελεστές βαρύτητας ελεγχόμενων κριτηρίων έπειτα από βιβλιογραφική έρευνα και σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim (2025) .....                                                                                                                                                                                     | 134 |
| Εικόνα 79. Αναδιαμορφωμένοι συντελεστές βαρύτητας ελεγχόμενων κριτηρίων έπειτα από βιβλιογραφική έρευνα και σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim (2025) .....                                                                                                                                                                    | 134 |

|                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 80. Το βασικό περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Visual PROMETHEE για την εισαγωγή και διαχείριση δεδομένων επίλυσης. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....                                  | 144 |
| Εικόνα 81. Τιμές των ροών προτίμησης και τα αποτελέσματα της κατάταξης των εναλλακτικών. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα. ....                                                                     | 145 |
| Εικόνα 82. Μερική κατάταξη σύμφωνα με την PROMETHEE I. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....                                                                                                        | 145 |
| Εικόνα 83. Πλήρης κατάταξη σύμφωνα με την PROMETHEE II. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....                                                                                                       | 146 |
| Εικόνα 84. Διάγραμμα PROMETHEE Diamond. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....                                                                                                                       | 147 |
| Εικόνα 85. Δυναμική Ανάλυση Βαρών (Walking Weights). Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....                                                                                                          | 148 |
| Εικόνα 86. Διάγραμμα PROMETHEE Rainbow. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....                                                                                                                       | 148 |
| Εικόνα 87. Ανάλυση GAIA. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα. ....                                                                                                                                     | 149 |
| Εικόνα 88. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της ετήσιας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 30,87% , 100%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα..... | 151 |
| Εικόνα 89. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 70,70%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....                | 152 |
| Εικόνα 90. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας υγρασίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 3,73% , 13,05%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....                 | 153 |
| Εικόνα 91. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέγιστης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 23,71%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....     | 154 |
| Εικόνα 92. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέγιστης ετήσιας ηλιοφάνειας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 11,60% , 31,99%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.....          | 155 |

|                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 93. Το βασικό περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Visual PROMETHEE για την εισαγωγή και διαχείριση δεδομένων επίλυσης. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.....                                   | 156 |
| Εικόνα 94. Τιμές των ροών προτίμησης και τα αποτελέσματα της κατάταξης των εναλλακτικών. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim. ....                                                                      | 157 |
| Εικόνα 95. Μερική κατάταξη σύμφωνα με την PROMETHEE I. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.....                                                                                                         | 157 |
| Εικόνα 96. Πλήρης κατάταξη σύμφωνα με την PROMETHEE II. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.....                                                                                                        | 158 |
| Εικόνα 97. Διάγραμμα PROMETHEE Diamond. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.....                                                                                                                        | 159 |
| Εικόνα 98. Δυναμική Ανάλυση Βαρών (Walking Weights). Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.....                                                                                                           | 160 |
| Εικόνα 99. Διάγραμμα PROMETHEE Rainbow. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.....                                                                                                                        | 160 |
| Εικόνα 100. Ανάλυση GAIA. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim. ....                                                                                                                                     | 161 |
| Εικόνα 101. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της ετήσιας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 40,59% , 100%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim..... | 162 |
| Εικόνα 102. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 12,22%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.....                | 163 |
| Εικόνα 103. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας υγρασίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 4,05%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.....                     | 164 |
| Εικόνα 104. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέγιστης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 8,27%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim .....     | 165 |
| Εικόνα 105. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας ηλιοφάνειας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 25,21% , 33,89%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim. ....            | 166 |
| Εικόνα 106. Σειρά κατάταξης εξεταζόμενων θέσεων .....                                                                                                                                                                                 | 167 |

## Abstract

The subject of this M.Sc. thesis is the evaluation of alternative locations for the siting of photovoltaic systems, considering only meteorological criteria and assuming that all other parameters affecting the problem are identical across the examined locations.

The locations selected for examination are those of the airports of Tympaki, Rhodes, Santorini, Heraklion, Larissa, Kalamata, and Kastoria, where meteorological data are available.

The evaluation criteria are:

- Annual global horizontal solar radiation
- Average annual temperature
- Average annual humidity
- Maximum annual wind speed
- Average annual sunshine duration

The assessment of these criteria was carried out using the PROMETHEE multi-criteria analysis method, applying two sets of weighting coefficients. One set is proposed in the study by Karadöl & Yıldırım (2025), while the other resulted from the processing of data obtained through a conducted literature review. A sensitivity analysis was performed on the results of the evaluation.

Finally, the ranking results derived from the application of the PROMETHEE method for the two weighting sets are compared both with each other and with the ranking obtained based on GIS maps of energy production potential from SolarGis.

**Keywords:** Photovoltaic energy systems , Site selection , Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), Geographic Information Systems (GIS) , Electricity generation potential assessment

# 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή

## 1.1 Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση εναλλακτικών θέσεων για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εξετάζοντας μόνο μετεωρολογικά κριτήρια και θεωρώντας κατά παραδοχή ότι κάθε άλλη παράμετρος που επηρεάζει το πρόβλημα ταυτίζεται στις εξεταζόμενες θέσεις.

Οι θέσεις που επιλέχθηκαν να εξεταστούν είναι εκείνες των αεροδρομίων Τυμπακίου, Ρόδου, Σαντορίνης, Ηρακλείου, Λάρισας, Καλαμάτας και Καστοριάς όπου υπάρχει διαθεσιμότητα μετεωρολογικών δεδομένων.

Τα κριτήρια ελέγχου είναι:

- Η ετήσια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία
- Η μέση ετήσια θερμοκρασία
- Η μέση ετήσια υγρασία
- Η μέγιστη ετήσια ταχύτητα ανέμου
- Η μέση ετήσια ηλιοφάνεια

Η αξιολόγηση των κριτηρίων αυτών πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης PROMETHEE εφαρμόζοντας δυο σεντ συντελεστών βαρύτητας. Το ένα σεντ προτείνεται στη μελέτη των Karadöl & Yildirim (2025) ενώ το άλλο προέκυψε από επεξεργασία δεδομένων βιβλιογραφικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε. Στα αποτελέσματα της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Τέλος τα αποτελέσματα κατάταξης που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE για τα δύο σεντ βαρύτητας συγκρίνονται τόσο μεταξύ τους όσο και με την ιεράρχηση που προκύπτει με βάση GIS χάρτες δυναμικού παραγωγής ενέργειας της SolarGis

**Λέξεις κλειδιά :** Φωτοβολταϊκά Συστήματα Ενέργειας, Χωροθέτηση, Μετεωρολογικοί Παράγοντες, Μέθοδος PROMETHEE, Πολυκριτηριακή Ανάλυση, GIS, Δυναμικό Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

## 1.2 . Μεθοδολογία ανάλυσης

Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική επισκόπηση στο πεδίο της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων και εντοπίστηκαν άρθρα που δημοσιεύτηκαν μετά το 2020 τα οποία εφαρμόζουν

μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης και στην αξιολόγηση τους περιλαμβάνουν μετεωρολογικά κριτήρια.

Με βάση τα άρθρα αυτά ορίστηκαν τα κριτήρια ελέγχου καθώς και οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο. Τα ελεγχόμενα κριτήρια είναι η ετήσια οριζόντια ακτινοβολία, η μέση ετήσια θερμοκρασία, η μέση ετήσια υγρασία, η μέγιστη ετήσια ταχύτητα ανέμου και η μέση ετήσια ηλιοφάνεια.

Όταν σε μια μελέτη τα μετεωρολογικά κριτήρια αποτελούν ένα μέρος του συνόλου των κριτηρίων, αυτά αντιμετωπίστηκαν ως μια ομάδα και η αναγωγή της βαρύτητας πραγματοποιήθηκε εντός της ομάδας των μετεωρολογικών κριτηρίων ώστε να δημιουργηθεί τελικά μια ενιαία βάση αξιολόγησης. Εν τέλει τα αποτελέσματα βαρύτητας για κάθε κριτήριο αξιολογήθηκαν στατιστικά με το κριτήριο της διαμέσου.

Ταυτόχρονα καταγράφηκαν οι συντελεστές βαρύτητας που προτείνονται από τη μελέτη των Karadöl & Yildirim (2025) η οποία εξετάζει το πρόβλημα της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών με τα ίδια μετεωρολογικά κριτήρια.

Στη συνέχεια αναζητήθηκαν θέσεις με γνωστά μετεωρολογικά δεδομένα ώστε να εξεταστεί η ιεράρχηση τους. Οι εξεταζόμενες θέσεις επιλέχθηκαν μεταξύ των μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ σε διάφορες τοποθεσίες εντός της ελληνικής επικράτειας. Η επιλογή πραγματοποιήθηκε κατά τρόπο ώστε να διαφοροποιούνται μεταξύ τους κατά το δυνατό ως προς το δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά ενώ ταυτόχρονα καλύπτουν διάφορες θέσεις τόσο κατά τη διεύθυνση ανατολής δύσης όσο και κατά τη διεύθυνση βορά – νότου.

Επιπλέον αναγκαία προϋπόθεση ήταν η διαθεσιμότητα στατιστικών στοιχείων για όλα τα εξεταζόμενα κριτήρια.

Οι θέσεις που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν σε μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται στους χώρους των αεροδρομίων Τυμπακίου, Ρόδου, Σαντορίνης, Ηρακλείου, Καλαμάτας, Λάρισας και Καστοριάς.

Επιπλέον των μετεωρολογικών δεδομένων που αντλήθηκαν από την ΕΜΥ, χρησιμοποιήθηκαν χάρτες GIS της SolarGis οι οποίοι περιλαμβάνουν πληροφορίες αναφορικά με την ετήσια οριζόντια ακτινοβολία και το δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά.

Τέλος, η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την κατάταξη των εξεταζόμενων θέσεων ως προς την καταλληλότητα τους για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάρκων είναι η PROMETHEE και η εφαρμογή της πραγματοποιήθηκε με δύο σετ συντελεστών βαρύτητας. Το ένα εξ' αυτών προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων της βιβλιογραφικής επισκόπησης που

διενεργήθηκε ενώ το άλλο από τη μελέτη των Karadöl & Yildirim (2025). Για την εφαρμογή της μεθόδου, επιλέχθηκε η συνάρτηση προτίμησης V Shape με κατώφλι προτίμησης  $p=0.65$ . Τα αποτελέσματα της ιεράρχησης που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου με τα προαναφερθέντα δύο σετ συντελεστών βαρύτητας, συγκρίθηκαν με την κατάταξη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά του σχετικού χάρτη της Solar Gis. Τέλος πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας στα αποτελέσματα της μεθόδου Promethee.

### 1.3 . Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε επτά κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και περιλαμβάνει περίληψη της παρούσας μελέτης, τη μεθοδολογία ανάλυσης και τη δομή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το νομικό πλαίσιο για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών, όπου συμπεριλαμβάνεται το ισχύον νομικό πλαίσιο καθώς και το νέο Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται θεωρητικά ζητήματα των ΑΠΕ στο ευρύτερο πεδίο των οποίων εντάσσεται η μελέτη της παρούσας εργασίας καθώς και θεωρητικά στοιχεία της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης με ειδικότερη ανάπτυξη της μεθόδου PROMETHEE η οποία εφαρμόζεται και στην παρούσα εργασία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική επισκόπηση της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων με έμφαση στις εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες και τα κριτήρια αξιολόγησης.

Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE στην αξιολόγηση της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων με βάση μετεωρολογικά κριτήρια. Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται με δύο σετ συντελεστών βαρύτητας εκ των οποίων το ένα προκύπτει από επεξεργασία δεδομένων της βιβλιογραφικής έρευνας και το άλλο προκύπτει από τη μελέτη των των Karadöl & Yildirim (2025).

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς με βάση τα δύο σετ βαρύτητας και αντιπαραβάλλονται με την κατάταξη που προκύπτει για τις εξεταζόμενες θέσεις με βάση GIS χάρτες δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά.

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Νομικό πλαίσιο για τη χωροθέτηση των φωτοβολταϊκών σταθμών στην Ελλάδα

### 2.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί έναν από τους βασικούς άξονες της ελληνικής και ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής, με στόχο την απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας. Όπως ορίζεται στον εθνικό στρατηγικό σχεδιασμό, η επιταχυνόμενη διείσδυση των καθαρών πηγών ενέργειας είναι απαραίτητη για τη ριζική μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας, με συγκεκριμένο στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 58% έως το 2030. Στο πλαίσιο αυτό, οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί αποτελούν την ταχύτερα αναπτυσσόμενη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην Ελλάδα, γεγονός που καθιστά τη χωροθέτησή τους ζήτημα ιδιαίτερης σημασίας τόσο για τον χωρικό σχεδιασμό όσο και για την προστασία του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος.

Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνικό ή οικονομικό ζήτημα. Η δυνατότητα υλοποίησης μιας επένδυσης εξαρτάται από ένα σύνθετο πλέγμα χωροταξικών, πολεοδομικών, περιβαλλοντικών και αδειοδοτικών διατάξεων, οι οποίες καθορίζουν τις επιτρεπόμενες χρήσεις γης, τις περιοχές αποκλεισμού, τους όρους προστασίας του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος και τις προϋποθέσεις περιβαλλοντικής αδειοδότησης.

Στην παρούσα εργασία, ωστόσο, η έννοια της καταλληλότητας χρησιμοποιείται με διαφορετική έννοια. Σκοπός της ανάλυσης δεν είναι η αξιολόγηση της νομικής ή χωροταξικής δυνατότητας εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, αλλά η σύγκριση εναλλακτικών θέσεων ως προς τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ενεργειακή τους απόδοση, μέσω της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE. Για τον λόγο αυτό, το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει συνοπτικά το θεσμικό πλαίσιο μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών στην Ελλάδα, χωρίς τα σχετικά κριτήρια να αποτελούν μεταβλητές της πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

## 2.2 Ισχύον θεσμικό πλαίσιο για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών

Το ισχύον πλαίσιο χωροθέτησης των εγκαταστάσεων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα καθορίζεται από το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΕΧΠ-ΑΠΕ), το οποίο εγκρίθηκε με την Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΝΕΠ/89998/3072/2026 (ΦΕΚ Δ' 694/19.08.2026). Με την έναρξη ισχύος του νέου ΕΧΠ-ΑΠΕ καταργήθηκε το προηγούμενο Ειδικό Πλαίσιο του 2008, το οποίο αποτέλεσε για σχεδόν δύο δεκαετίες το βασικό εργαλείο χωροταξικού σχεδιασμού για την ανάπτυξη έργων ΑΠΕ στη χώρα.

Σύμφωνα με το άρθρο 1 του νέου ΕΧΠ-ΑΠΕ, σκοπός του είναι η διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου κανόνων, κατευθύνσεων και ρυθμίσεων για τη χωρική οργάνωση και ανάπτυξη των εγκαταστάσεων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και των επιμέρους κατηγοριών τους. Το πλαίσιο αυτό διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη τρεις βασικούς άξονες: (α) τον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό και την ανάγκη επίτευξης των εκάστοτε εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων για την προώθηση των ΑΠΕ και την αύξηση της συμμετοχής τους στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, (β) τη φυσιογνωμία και τα ιδιαίτερα χωρικά χαρακτηριστικά του ηπειρωτικού, νησιωτικού και θαλάσσιου χώρου και (γ) την ανάγκη προστασίας και ορθολογικής διαχείρισης των περιοχών με ιδιαίτερη περιβαλλοντική, οικολογική και πολιτιστική αξία, καθώς και των περιοχών που εμφανίζουν αυξημένη ευαλωτότητα στην κλιματική μεταβολή.

Το ΕΧΠ-ΑΠΕ δεν λειτουργεί αυτοτελώς, αλλά εντάσσεται στο ευρύτερο σύστημα χωρικού σχεδιασμού που προβλέπεται από τον Ν. 5306/2026 (Κώδικας Χωροταξίας και Πολεοδομίας «Νικόλαος Ταγαράς»). Ως εκ τούτου, η χωροθέτηση ενός φωτοβολταϊκού σταθμού οφείλει να είναι συμβατή όχι μόνο με τις κατευθύνσεις του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου, αλλά και με τα υποκείμενα επίπεδα χωρικού σχεδιασμού, όπως τα Περιφερειακά Χωροταξικά Πλαίσια, τα Τοπικά και τα Ειδικά Πολεοδομικά Σχέδια.

Παράλληλα, η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών διέπεται από το σύστημα περιβαλλοντικής αδειοδότησης του Ν. 4014/2011, όπως ισχύει, ενώ η περιβαλλοντική κατάταξη των έργων εξειδικεύεται με την Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΠΙΑ/63951/4418/2024. Ανάλογα με την κατηγορία και τα χαρακτηριστικά του έργου, απαιτείται είτε η έκδοση Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) είτε η υπαγωγή σε Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις (ΠΠΔ).

Επιπλέον, η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών επηρεάζεται από ειδικές διατάξεις που αφορούν τη γεωργική γη υψηλής παραγωγικότητας, τις δασικές εκτάσεις, τις προστατευόμενες περιοχές του δικτύου Natura 2000, καθώς και τους αρχαιολογικούς χώρους και τα μνημεία. Παράλληλα, ζητήματα που σχετίζονται με την αδειοδοτική διαδικασία και την ανάπτυξη έργων ΑΠΕ ρυθμίζονται από τον Ν. 4951/2022 και τις κανονιστικές πράξεις που εκδόθηκαν κατ' εξουσιοδότησή του. Συνεπώς, η δυνατότητα εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού δεν προκύπτει αποκλειστικά από τις διατάξεις του ΕΧΠ-ΑΠΕ, αλλά από τη συνδυασμένη εφαρμογή του συνόλου του χωροταξικού, πολεοδομικού, περιβαλλοντικού και ενεργειακού θεσμικού πλαισίου.

### **2.3 Βασικές ρυθμίσεις του νέου Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών**

Το νέο Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας εξειδικεύει τα κριτήρια χωροθέτησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας στο άρθρο 16, εισάγοντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα χωρικών περιορισμών, προϋποθέσεων και κανόνων που αποσκοπεί στην ισόρροπη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε συνδυασμό με την προστασία του φυσικού, πολιτιστικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Τα κριτήρια αυτά εφαρμόζονται συμπληρωματικά προς τις διατάξεις της περιβαλλοντικής και πολεοδομικής νομοθεσίας και αποτελούν το βασικό πλαίσιο αξιολόγησης της χωροθετικής καταλληλότητας ενός έργου.

Βασική καινοτομία του νέου πλαισίου αποτελεί η εισαγωγή ανώτατου ποσοστού εδαφικής κάλυψης από φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ανά Περιφερειακή Ενότητα. Συγκεκριμένα, προβλέπεται ότι η συνολική έκταση που μπορεί να καταλαμβάνεται από φωτοβολταϊκούς σταθμούς δεν μπορεί να υπερβαίνει το 1,5 % της συνολικής έκτασης κάθε Περιφερειακής Ενότητας, ενώ για τον υπολογισμό της απαιτούμενης έκτασης λαμβάνεται ως τυπική κάλυψη τα 14 στρέμματα ανά εγκατεστημένο MW. Η διάταξη αυτή εισάγει για πρώτη φορά μηχανισμό ελέγχου της χωρικής συγκέντρωσης των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και αποσκοπεί στη διατήρηση ισορροπίας μεταξύ της ανάπτυξης των ΑΠΕ και των λοιπών χρήσεων γης.

Για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών σε γεωργική γη υψηλής παραγωγικότητας το ΕΧΠ-ΑΠΕ δεν θεσπίζει νέο αυτοτελές καθεστώς, αλλά παραπέμπει ρητά στις ισχύουσες διατάξεις του άρθρου 56 του Ν. 2637/1998 και στην ΚΥΑ

ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/104605/4389/2022. Αντίστοιχα, για τις αγροφωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (Agri-PV) εφαρμόζονται οι ειδικές ρυθμίσεις των άρθρων 96B–96Δ του Ν. 4951/2022, αναγνωρίζοντας τον ιδιαίτερο χαρακτήρα των έργων αυτών ως συνδυασμού γεωργικής δραστηριότητας και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στην αξιολόγηση των σωρευτικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το άρθρο 16 προβλέπει ότι όταν γειτνιάζουν περισσότερες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, οι οποίες μεμονωμένα δεν υπάγονται σε διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης, εξετάζονται αθροιστικά ως προς την εγκατεστημένη ισχύ τους, ώστε να αξιολογούνται οι συνολικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και να αποφεύγεται η τεχνητή κατάτμηση έργων με σκοπό την αποφυγή αυστηρότερων αδειοδοτικών απαιτήσεων.

Το νέο πλαίσιο εισάγει ακόμη ειδικές κατευθύνσεις για ορισμένες κατηγορίες εγκαταστάσεων. Στον νησιωτικό χώρο, πλην της Κρήτης και της Εύβοιας, προκρίνεται η κατά προτεραιότητα ανάπτυξη μικρών φωτοβολταϊκών σταθμών, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις περιορισμένες χωρικές δυνατότητες των νησιωτικών περιοχών. Παράλληλα, προβλέπονται ειδικές ρυθμίσεις για την εγκατάσταση πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε τεχνητές λίμνες, λιμνοδεξαμενές, ταμιευτήρες και λοιπά τεχνητά υδάτινα σώματα, καθώς και σε υδάτινα σώματα που έχουν δημιουργηθεί σε εξαντλημένες εξορυκτικές εκμεταλλεύσεις, υπό τις προϋποθέσεις που ορίζονται στην κείμενη νομοθεσία.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται στην προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς και του τοπίου. Για εγκαταστάσεις που χωροθετούνται σε μικρή απόσταση από μνημεία της UNESCO, αρχαιολογικούς χώρους, ιστορικούς τόπους, παραδοσιακούς οικισμούς και λοιπά προστατευόμενα πολιτιστικά αγαθά απαιτείται η εκπόνηση ειδικής μελέτης θέασης κατά το στάδιο της περιβαλλοντικής αδειοδότησης, προκειμένου να αξιολογηθεί η οπτική επίδραση των εγκαταστάσεων στο προστατευόμενο τοπίο.

Παράλληλα, το ΕΧΠ-ΑΠΕ προβλέπει ότι η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων πρέπει να τηρεί τις ελάχιστες αποστάσεις από γειτνιάζουσες χρήσεις γης, δραστηριότητες και δίκτυα τεχνικής υποδομής, όπως αυτές καθορίζονται στο Παράρτημα II του Πλαισίου. Επιπλέον, για φωτοβολταϊκούς σταθμούς μεγάλης ισχύος, άνω των 100 MW, αλλά και για εγκαταστάσεις που αναπτύσσονται σε μικρή απόσταση από οικισμούς ή περιοχές ιδιαίτερου περιβαλλοντικού ή πολιτιστικού ενδιαφέροντος, εισάγονται πρόσθετοι περιορισμοί που

αφορούν τόσο τις ελάχιστες αποστάσεις όσο και την οπτική όχληση, μέσω ελέγχου του ποσοστού κάλυψης του οπτικού ορίζοντα.

Το νέο πλαίσιο περιλαμβάνει επίσης ειδικές προβλέψεις για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που αναπτύσσονται σε περιοχές ευάλωτες σε φυσικούς κινδύνους, όπως περιοχές με αυξημένη πλημμυρική επικινδυνότητα, καθώς και για έργα που χωροθετούνται στον θαλάσσιο χώρο ή εντός λιμνών, όπου απαιτείται να λαμβάνονται υπόψη, μεταξύ άλλων, τα αλιευτικά πεδία και οι αναγκαίες αποστάσεις ασφαλείας. Επιπλέον, για έργα εντός περιοχών του δικτύου Natura 2000, η Ειδική Οικολογική Αξιολόγηση οφείλει να συνεκτιμά και τις Σημαντικές Περιοχές για τα Πουλιά (ΣΠΠ), ενισχύοντας την προστασία της βιοποικιλότητας.

Συνολικά, το νέο ΕΧΠ-ΑΠΕ μεταβάλλει ουσιαστικά τη φιλοσοφία της χωροθέτησης των φωτοβολταϊκών σταθμών. Ενώ το προηγούμενο πλαίσιο επικεντρωνόταν κυρίως στον καθορισμό περιοχών καταλληλότητας και αποκλεισμού, το ισχύον πλαίσιο υιοθετεί μια περισσότερο ολοκληρωμένη προσέγγιση, συνδυάζοντας ποσοτικά όρια χωρικής ανάπτυξης, κανόνες προστασίας του τοπίου και της πολιτιστικής κληρονομιάς, ελάχιστες αποστάσεις από ευαίσθητες χρήσεις και αξιολόγηση των σωρευτικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η επίτευξη των ενεργειακών στόχων της χώρας, διασφαλίζοντας παράλληλα τη βιώσιμη οργάνωση του χώρου και την προστασία των φυσικών και πολιτιστικών πόρων.

## 2.4 Συμπεράσματα

Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών στην Ελλάδα διέπεται από ένα σύνθετο και πολυεπίπεδο θεσμικό πλαίσιο, στο οποίο συνδυάζονται διατάξεις χωροταξικού, περιβαλλοντικού, πολεοδομικού και ενεργειακού δικαίου. Κεντρικό σημείο αναφοράς αποτελεί πλέον το νέο Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΦΕΚ Δ' 694/2026), το οποίο αντικατέστησε το αντίστοιχο πλαίσιο του 2008 και εισήγαγε ένα σαφέστερο και περισσότερο εξειδικευμένο σύστημα κανόνων για τη χωροθέτηση των εγκαταστάσεων ΑΠΕ.

Οι προβλέψεις για περιοχές αποκλεισμού, περιοχές ασυμβατότητας, όρια χωρικής συγκέντρωσης, προστασία της γεωργικής γης υψηλής παραγωγικότητας, διατήρηση της βιοποικιλότητας και προστασία του τοπίου αποτυπώνουν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, η

οποία επιδιώκει να εξισορροπήσει την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τη διαφύλαξη των φυσικών και ανθρωπογενών πόρων.

Παράλληλα, η χωροθέτηση ενός φωτοβολταϊκού σταθμού δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις προβλέψεις του Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου. Η τελική δυνατότητα υλοποίησης ενός έργου προϋποθέτει τη συμμόρφωση με το σύνολο της ισχύουσας νομοθεσίας, συμπεριλαμβανομένων των διατάξεων για την περιβαλλοντική αδειοδότηση, την προστασία των περιοχών Natura 2000, των δασικών εκτάσεων, των αρχαιολογικών χώρων, των χρήσεων γης και της γεωργικής γης υψηλής παραγωγικότητας. Επομένως, η χωροθετική καταλληλότητα μιας έκτασης αποτελεί αποτέλεσμα της συνδυασμένης εφαρμογής πολλών θεσμικών εργαλείων και όχι αποκλειστικά του χωροταξικού σχεδιασμού.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ωστόσο, το θεσμικό αυτό πλαίσιο παρουσιάζεται αποκλειστικά για την κατανόηση του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο αναπτύσσονται οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί στην Ελλάδα. Τα νομικά και χωροταξικά κριτήρια δεν ενσωματώνονται στην πολυκριτηριακή ανάλυση που ακολουθεί, καθώς αντικείμενο της έρευνας δεν αποτελεί η διερεύνηση της νομικής ή αδειοδοτικής καταλληλότητας των υποψήφιων θέσεων.

Η εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης και ειδικότερα της μεθόδου PROMETHEE στο επόμενο μέρος της εργασίας, περιορίζεται αποκλειστικά στην αξιολόγηση της μετεωρολογικής και ενεργειακής καταλληλότητας των εξεταζόμενων περιοχών, μέσω κριτηρίων που σχετίζονται με το ηλιακό δυναμικό και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής αξιολόγησης δεν συνιστούν απόφαση χωροθέτησης ούτε τεκμηριώνουν τη δυνατότητα αδειοδότησης ενός πραγματικού έργου, αλλά αποτυπώνουν τη συγκριτική καταλληλότητα των εξεταζόμενων θέσεων αποκλειστικά ως προς τα χαρακτηριστικά που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη.

### **3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Θεωρητικά στοιχεία για τις ΑΠΕ**

#### **3.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια , βιομάζα, υδροηλεκτρική ενέργεια, γεωθερμική ενέργεια).**

##### **3.1.1 Εισαγωγικά**

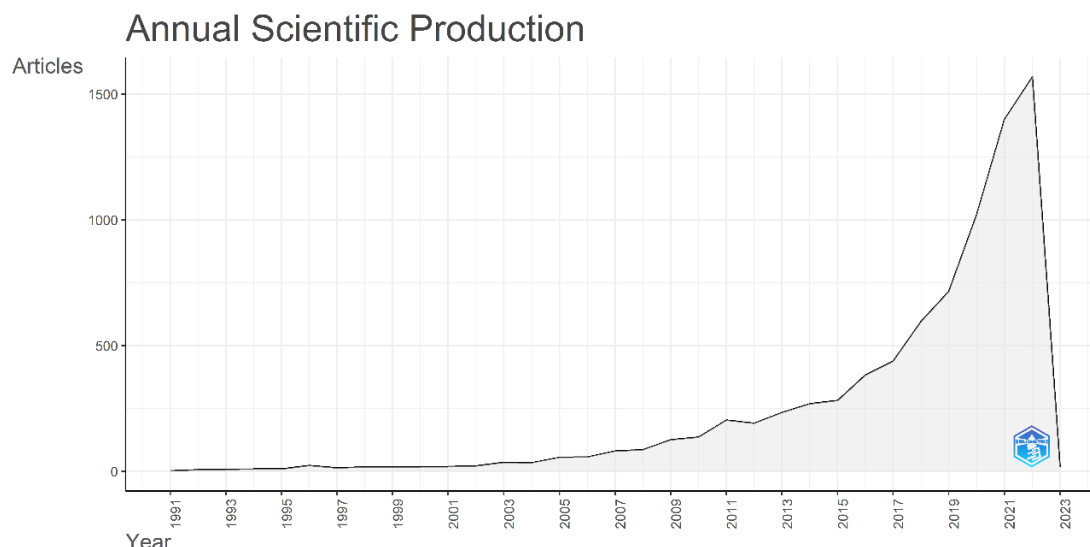
Οι επιπτώσεις της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, και ειδικότερα της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη, έχουν πλέον καταστεί αισθητές σε παγκόσμια κλίμακα, επηρεάζοντας τόσο τα φυσικά οικοσυστήματα όσο και την ανθρώπινη δραστηριότητα. Η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας και η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων έχουν ασκήσει έντονη πίεση στις κυβερνήσεις και στους διεθνείς οργανισμούς για την αναζήτηση συλλογικών λύσεων με μακροπρόθεσμο χαρακτήρα (García-Lillo et al., 2023).

Η κύρια πρόκληση για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής είναι η επίτευξη οικονομικής ανάπτυξης χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα του περιβάλλοντος. Το παραδοσιακό ενεργειακό μοντέλο, το οποίο βασίζεται στην εκτεταμένη χρήση ορυκτών καυσίμων, έχει συμβάλει καθοριστικά στην οικονομική ανάπτυξη, ωστόσο συνοδεύεται από υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ρύπανση και αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

Στο πλαίσιο αυτό, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αναδεικνύονται ως βασικό εργαλείο για την ενίσχυση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Οι επενδύσεις σε ΑΠΕ συνδέονται γενικά με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας και αποτελούν θεμελιώδη συνιστώσα της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης (García-Lillo et al., 2023).

##### **3.1.2 Επιστημονική έρευνα και διεθνείς τάσεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**

Η συνεχής αύξηση του ενδιαφέροντος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντικατοπτρίζεται στην αύξηση του πλήθους των επιστημονικών δημοσιεύσεων. Η βιβλιομετρική ανάλυση των García-Lillo et al. (2023), η οποία καταγράφει όλα τα επιστημονικά άρθρα σε θέματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και βιώσιμης ανάπτυξης έως τις 23 Νοεμβρίου 2022, δείχνει ότι, παρότι το ενδιαφέρον για το αντικείμενο αυξανόταν σταδιακά ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 2010. Ωστόσο το έτος 2015 σηματοδοτεί μια έντονη επιτάχυνση της ερευνητικής δραστηριότητας και το 2017 αποτελεί σημείο καμπής, καθώς από το έτος αυτό και μετά παρατηρείται εκθετική αύξηση στον αριθμό των δημοσιεύσεων.

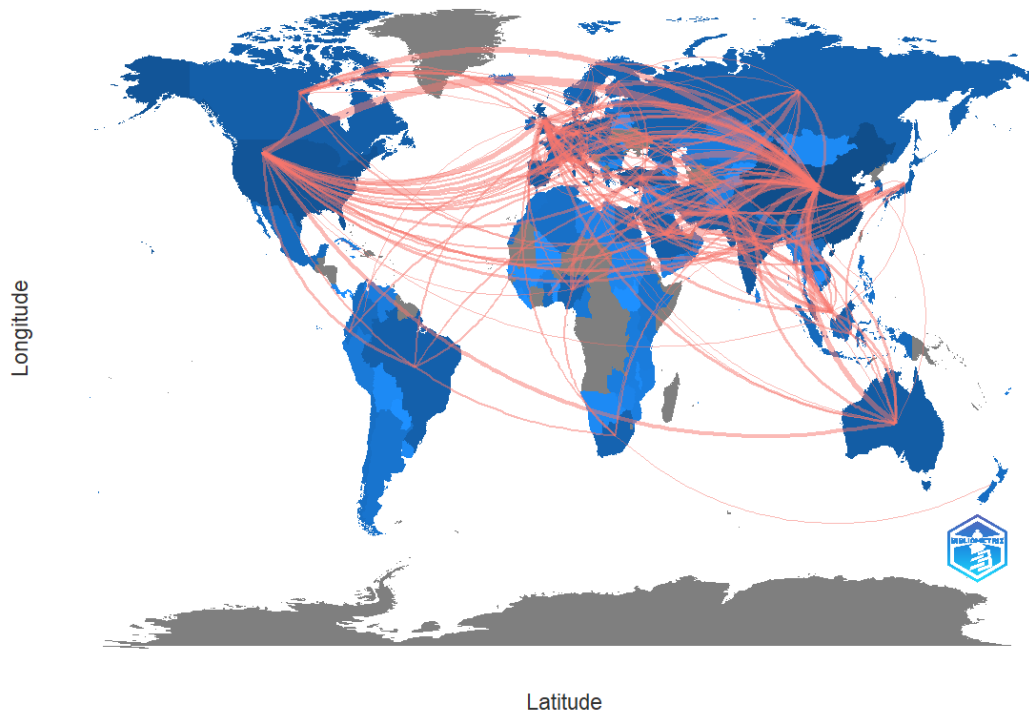


Εικόνα 1 Εξέλιξη της ερευνητικής δραστηριότητας με αντικείμενο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Πηγή: (García-Lillo , 2023).

Τα επιστημονικά περιοδικά με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στον τομέα της βιώσιμης ανάπτυξης και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα *Energies*, *Sustainability* και *Journal of Cleaner Production*, τα οποία εστιάζουν σε θέματα περιβαλλοντικής κοινωνικής και οικονομικής βιωσιμότητας και χαρακτηρίζονται από υψηλή επιδρατικότητα (García-Lillo et al., 2023).

Σε γεωγραφικό επίπεδο, η Κίνα καταγράφεται ως η πιο παραγωγική χώρα στην έρευνα για τις ΑΠΕ και τη βιώσιμη ανάπτυξη, ακολουθούμενη από τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και το Ηνωμένο Βασίλειο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ποσοστά διεθνούς συνεργασίας, με την Αυστραλία να εμφανίζει το υψηλότερο επίπεδο συνεργασιών μεταξύ χωρών, ακολουθούμενη από την Κίνα, το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ισπανία, τις ΗΠΑ, την Ιταλία, τη Γερμανία, την Ινδία, την Πολωνία και την Τουρκία (García-Lillo et al., 2023).

Η ανάλυση αυτή αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της ενεργειακής πολιτικής, του στρατηγικού σχεδιασμού σε κυβερνητικό επίπεδο και της εφαρμογής δράσεων που εστιάζουν στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, της αποθήκευσης ενέργειας, της ασφάλειας εφοδιασμού και της τεχνολογικής καινοτομίας.



Εικόνα 2 Παγκόσμιος χάρτης συνεργασιών (Πηγή: (García-Lillo , 2023).

### 3.1.3 Κατηγορίες και τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

#### 3.1.3.1 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια προσελκύσει ιδιαίτερα υψηλή προσοχή, σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας, από την κοινότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ηλιακή θερμική ενέργεια και οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες έχουν συμβάλει στην καθιέρωση της ηλιακής ενέργειας ως μιας από τις πιο αξιοποιήσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, η ενεργειακή τους απόδοση και ο διακοπτόμενος χαρακτήρας στη λειτουργία τους, δρουν περιοριστικά στη μεγέθυνση της ένταξής τους στην παγκόσμια ενεργειακή προσφορά και αποτελούν αντικείμενο διαρκούς έρευνας και εξέλιξης. (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

Οι δύο κύριες τεχνολογικές κατηγορίες ανάπτυξης είναι η ηλιακή θερμική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες απορροφούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν σε θερμότητα, η οποία μεταφέρεται μέσω κυκλοφορούντος ρευστού είτε για άμεσες εφαρμογές θέρμανσης είτε, σε υψηλότερες θερμοκρασίες, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένες τεχνολογίες βασίζονται στη συγκέντρωση της ηλιακής

ακτινοβολίας σε γραμμική ή σημειακή εστίαση, επιτυγχάνοντας υψηλές ενεργειακές πυκνότητες.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ενσωματώνουν τεχνολογία μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά με κρυσταλλικό πυρίτιο αποτελούν την πλέον διαδεδομένη και ώριμη τεχνολογία για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας, ενώ εναλλακτικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν το άμορφο πυρίτιο (a-Si), το καδμίου-τελουριδίου (CdTe) και τα φωτοβολταϊκά χαλκού-γαλλίου-ινδίου-σεληνιδίου (CIGS). Παρά τα πλεονεκτήματά τους, ορισμένες από αυτές τις τεχνολογίες αντιμετωπίζουν ζητήματα βιωσιμότητας λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας κρίσιμων πρώτων υλών (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

Βασικές παράμετροι στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας είναι ο κύκλος ημέρας-νύχτας, οι καιρικές συνθήκες και οι εποχιακές μεταβολές, γεγονός που καθιστά την παραγωγή διαλείπουσα και μη ελεγχόμενη (Zhao, 2025).

### 3.1.3.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί έμμεσο τύπο ηλιακής ενέργειας, καθώς ο άνεμος προκαλείται από τη διαφορική θέρμανση της επιφάνειας της Γης. Σε περιοχές όπως η βόρεια Ευρώπη και οι νότιες Ηνωμένες Πολιτείες, το αιολικό δυναμικό θεωρείται επαρκές ώστε να καλύψει, θεωρητικά, το σύνολο της ηλεκτρικής ζήτησης (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

Σε χώρες όπου η χερσαία έκταση επαρκούς αιολικού δυναμικού είναι περιορισμένη, η υπεράκτια αιολική ενέργεια καθίσταται ολοένα και πιο δημοφιλής. Παράλληλα, η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων αιολικής και ηλιακής ενέργειας έχει ενισχυθεί, οδηγώντας σε μελέτες βελτιστοποίησης διαστασιολόγησης, διαχείρισης ενέργειας και εκτίμησης κόστους.

Η παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Σε χαμηλές ταχύτητες, η ισχύς εξόδου είναι περιορισμένη, ενώ σε πολύ υψηλές ταχύτητες οι ανεμογεννήτριες ενδέχεται να απενεργοποιούνται για λόγους προστασίας εξοπλισμού (Zhao, 2025). Η ακριβής πρόβλεψη του αιολικού δυναμικού αποτελεί, συνεπώς, τον πιο κρίσιμο παράγοντα για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των αιολικών πάρκων.

### 3.1.3.3 Γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια άφθονη και ανανεώσιμη πηγή, διαθέσιμη είτε σε ταμιευτήρες χαμηλής διαπερατότητας είτε σε διαπερατά πετρώματα, κυρίως σε ηφαιστειακές περιοχές ή στα όρια των τεκτονικών πλακών. Σε αντίθεση με την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια είναι διαθέσιμη συνεχώς, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους

και της ημέρας, γεγονός που της επιτρέπει να λειτουργεί συμπληρωματικά προς τις διαλείπουσες πηγές ενέργειας (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

Ωστόσο, μόνο μικρό ποσοστό του διαθέσιμου γεωθερμικού δυναμικού αξιοποιείται σήμερα εμπορικά, καθώς τεχνολογικοί περιορισμοί δεν επιτρέπουν την εκμετάλλευση των φυσικών ταμιευτήρων σε συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες.

#### **3.1.3.4 Βιοενέργεια και ενέργεια από απόβλητα**

Η βιομάζα ορίζεται ως η βιολογική ύλη που προέρχεται από κάποτε ζωντανούς οργανισμούς και περιλαμβάνει ενεργειακές καλλιέργειες, γεωργικά και δασικά υπολείμματα, υδρόβια φυτά, καθώς και αστικά και ζωικά απόβλητα. Η αξιοποίησή της μπορεί να γίνει είτε άμεσα μέσω καύσης για παραγωγή θερμότητας είτε έμμεσα μέσω μετατροπής σε βιοκαύσιμα ή βιοαέριο (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

Το βιοαέριο παράγεται μέσω χώνευσης οργανικής ύλης από μικτούς πληθυσμούς μικροοργανισμών υπό αναερόβιες συνθήκες, παρέχοντας μια ευεργετική οδό για την αξιοποίηση ορισμένων κατηγοριών βιομάζας.

Παράλληλα, οι τεχνολογίες μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια επιτρέπουν την παραγωγή βιοαλκοολών, βιοϋδρογόνου και άλλων καυσίμων, αν και ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα υποπροϊόντα, συμπεριλαμβανομένων τοξικών και επικίνδυνων ρύπων.

Παρά το γεγονός ότι τα βιοκαύσιμα αντιπροσωπεύουν σήμερα περίπου το 2% της παγκόσμιας κατανάλωσης βενζίνης, η συμβολή τους αναμένεται να αυξηθεί λόγω των πλεονεκτημάτων τους, όπως η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και η δημιουργία νέων πηγών εισοδήματος για τον αγροτικό τομέα (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

#### **3.1.3.5 Παλιρροιακή, κυματική και ωκεάνια ενέργεια**

Το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της ωκεάνιας ενέργειας αυξάνεται διεθνώς, κυρίως λόγω της εκτεταμένης διαθεσιμότητάς της και του σημαντικού θεωρητικού ενεργειακού δυναμικού των ωκεανών. Οι μορφές ωκεάνιας ενέργειας ταξινομούνται σε πέντε βασικές κατηγορίες: ενέργεια επιφανειακών κυμάτων, παλιρροιακή ενέργεια, ενέργεια ωκεάνιων ρευμάτων, θερμική ενέργεια των ωκεανών και ενέργεια κλίσης αλατότητας.

Παρά το υψηλό δυναμικό τους, η συμβολή των ωκεάνιων μορφών ενέργειας στον παγκόσμιο ενεργειακό εφοδιασμό παραμένει περιορισμένη, κυρίως λόγω τεχνολογικών και οικονομικών προκλήσεων. Από το 2015, η παλιρροιακή ενέργεια εμφανίζει τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη

ισχύ παγκοσμίως, ακολουθούμενη από την ενέργεια των ωκεάνιων ρευμάτων, ενώ η ενέργεια κλίσης αλατότητας βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης.

Η κυματική ενέργεια θεωρείται ιδιαίτερα υποσχόμενη λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που παρουσιάζει. Προέρχεται από τη μεταφορά της ενέργειας του ανέμου στην επιφάνεια του ωκεανού και παρουσιάζει υψηλότερο δυναμικό στις ζώνες μεταξύ 40° και 60° γεωγραφικού πλάτους, με το Ηνωμένο Βασίλειο να συγκαταλέγεται στις περιοχές με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη σχετικών τεχνολογιών. Ωστόσο, χαρακτηρίζεται από μεταβλητότητα και περιορισμένη προβλεψιμότητα.

Η ενέργεια των ωκεάνιων ρευμάτων οφείλεται στη θερμοαλατική κυκλοφορία και στους ανέμους και χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη σταθερότητα σε σύγκριση με την κυματική ενέργεια. Παρότι ωκεάνια ρεύματα απαντώνται παγκοσμίως, εκείνα που μπορούν να αξιοποιηθούν ενεργειακά είναι μόνο όσα είναι σταθερά και κοντά στις ακτές.

Η θερμική ενέργεια των ωκεανών προκύπτει από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειακών και των βαθύτερων υδάτων. Όταν η θερμοκρασιακή διαβάθμιση προσεγγίζει τους 20°C, μπορούν να εφαρμοστούν συστήματα μετατροπής θερμικής ενέργειας των ωκεανών (OTEC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, η ενέργεια κλίσης αλατότητας βασίζεται στο χημικό δυναμικό που αναπτύσσεται μεταξύ υγρών διαφορετικής αλατότητας, κυρίως στις εκβολές ποταμών ή σε υπεραλατώδη περιβάλλοντα. Οι βασικές τεχνολογίες αξιοποίησής της περιλαμβάνουν την αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση, την όσμωση με επιβράδυνση πίεσης και τη χωρητική ανάμειξη. (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

### 3.1.4 Αποθήκευση ενέργειας, έξυπνα δίκτυα και ενσωμάτωση ΑΠΕ

Η διαλείπουσα και μεταβλητή φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των ηλεκτρικών δικτύων. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, η αντλησιοταμίευση, οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020· Zhao, 2025).

Τα έξυπνα δίκτυα, σε συνδυασμό με προηγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EMS), υποδομές μέτρησης (AMI) και αυτοματοποίηση διανομής (DSA), επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, τη δυναμική ρύθμιση της ροής ισχύος και τη βελτιστοποίηση της αξιοποίησης των ΑΠΕ. Επιπλέον, η εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης ενισχύει την πρόβλεψη παραγωγής και φορτίου, συμβάλλοντας στη σταθερή λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Zhao, 2025).

### 3.1.5 Συμπεράσματα και σύνδεση με τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο της παγκόσμιας στρατηγικής για βιώσιμη ανάπτυξη, ενεργειακή ασφάλεια και αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Παρά τις τεχνολογικές, περιβαλλοντικές και λειτουργικές προκλήσεις που παρουσιάζουν, η πρόοδος στην αποθήκευση ενέργειας, στα έξυπνα δίκτυα και στα υβριδικά συστήματα δημιουργεί τις προϋποθέσεις για τη μαζική ενσωμάτωσή τους.

Στο πλαίσιο αυτό, η ορθολογική αξιολόγηση και επιλογή της χωροθέτησης έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και ειδικότερα φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθίσταται κρίσιμη..

## 3.2 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

### 3.2.1 Γενική θεώρηση και αρχές λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων

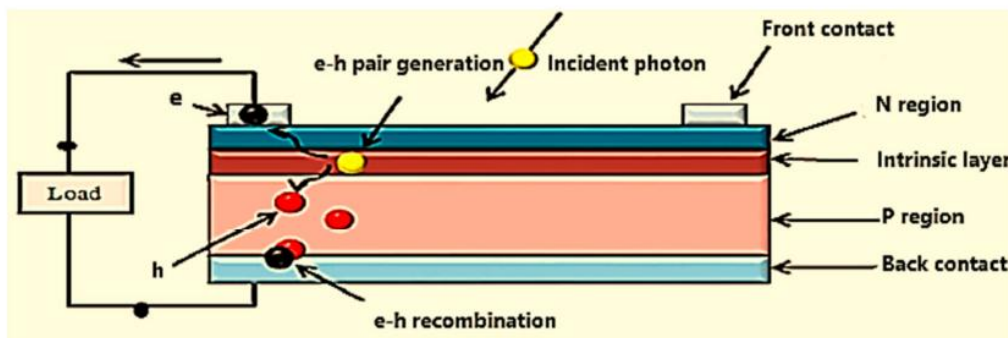
Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων αποτελεί σήμερα μία από τις πιο ώριμες και διαδεδομένες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η λειτουργία τους βασίζεται στη δυνατότητα άμεσης μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς ενδιάμεσα μηχανικά ή θερμικά στάδια, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικά, αξιόπιστα και περιβαλλοντικά φιλικά. Τα Φ/Β συστήματα έχουν αξιοποιηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια τόσο σε κεντροποιημένες όσο και σε αποκεντρωμένες εφαρμογές παραγωγής, συμβάλλοντας στη διασπορά της ηλεκτροπαραγωγής κοντά στα σημεία κατανάλωσης και στη μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής στο ηλεκτρικό δίκτυο (Vodapally & Ali, 2023).

### 3.2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και φυσική λειτουργία των κυψελών

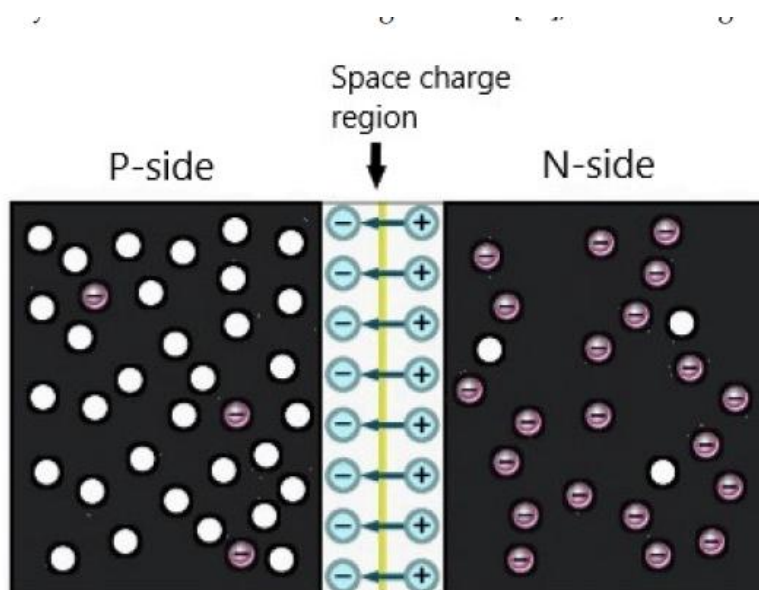
Η θεμελιώδης αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1839 από τον Alexandre Edmond Becquerel, ο οποίος διαπίστωσε ότι η έκθεση ορισμένων υλικών στο φως μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση ηλεκτρικού ρεύματος. Σε φυσικό επίπεδο, η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια τα οποία μεταφέρουν ενέργεια. Όταν τα φωτόνια προσπίπτουν σε ένα ημιαγωγικό υλικό, όπως το πυρίτιο, και η ενέργειά τους υπερβαίνει το ενεργειακό χάσμα του υλικού, προκαλείται η απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τις ατομικές τους θέσεις και η

δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου–οπής. Η ελεγχόμενη κίνηση αυτών των φορέων φορτίου οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (Vodapally & Ali, 2023).

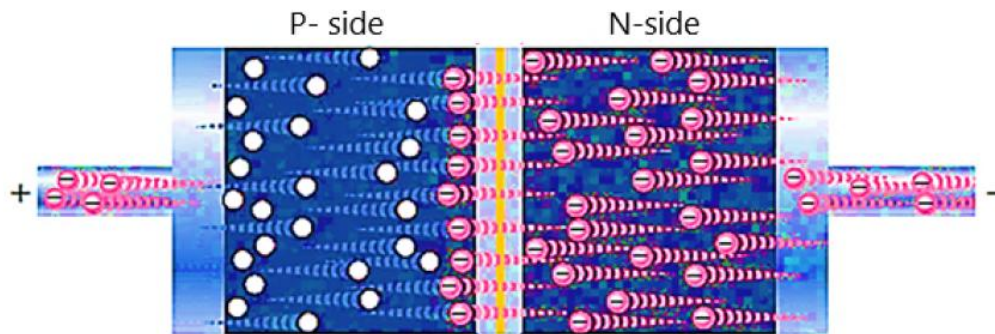
Η βασική δομική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο ή κυψέλη. Η κυψέλη αποτελείται από ημιαγωγικό υλικό, συνήθως πυρίτιο, το οποίο έχει υποστεί προσμίξεις ώστε να σχηματίσει δύο περιοχές διαφορετικού τύπου: την περιοχή τύπου n, πλούσια σε ελεύθερα ηλεκτρόνια, και την περιοχή τύπου p, όπου κυριαρχούν οι οπές. Στο όριο επαφής των δύο περιοχών σχηματίζεται η ένωση p–n, στην οποία αναπτύσσεται ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Το πεδίο αυτό διαχωρίζει τα παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίου–οπής και αποτρέπει την επανασύνδεσή τους, λειτουργώντας ουσιαστικά ως κατευθυντικός μηχανισμός ροής φορτίου. Όταν η κυψέλη συνδεθεί με εξωτερικό κύκλωμα, τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσω του κυκλώματος προς την πλευρά των οπών, παράγοντας συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (Al-Ezzi, 2022).



Εικόνα 3 Ένωση p–n σε φωτοβολταϊκό στοιχείο. (Πηγή: (Al-Ezzi, 2022).



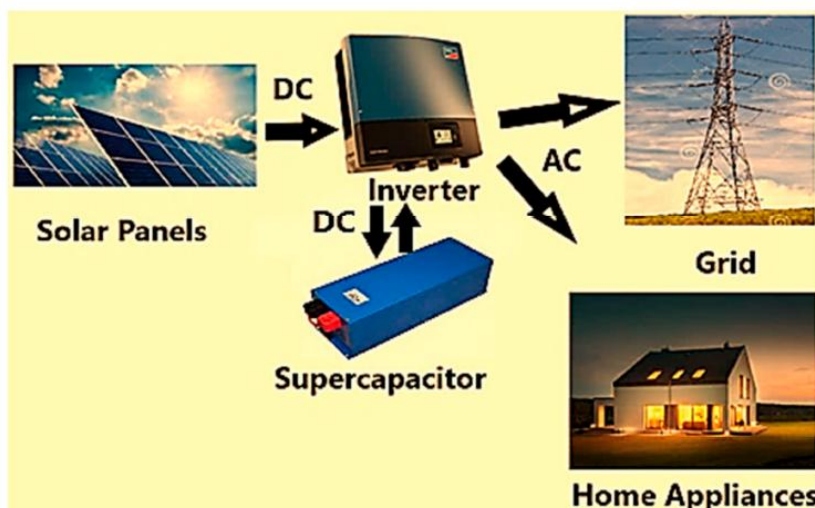
Εικόνα 4 Η βασική μορφή του ημιαγωγού τη στιγμή της σύνδεσης των τμημάτων p-n και η δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή φορτίου χώρου. Οι φορείς πλειονότητας σε μία δίοδο ορθής πόλωσης. (Πηγή: (Al-Ezzi, 2022).



Εικόνα 5 Η ροή των φορέων πλειονότητας σε δίοδο υπό ορθή πόλωση. (Πηγή: (Al-Ezzi, 2022).

### 3.2.3 Φωτοβολταϊκά πάνελ και τεχνολογικές κατηγορίες

Για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, οι φωτοβολταϊκές κυψέλες καλύπτονται με αντανάκλαστικά υλικά ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω ανάκλασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Πολλαπλές κυψέλες συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και παράλληλα, σχηματίζοντας φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία είναι σε θέση να παρέχουν τις απαιτούμενες τιμές τάσης και έντασης για πρακτικές εφαρμογές. Το παραγόμενο ρεύμα είναι συνεχές (DC) και για την ένταξή του στο ηλεκτρικό δίκτυο ή την τροφοδότηση συμβατικών φορτίων απαιτείται η χρήση αντιστροφέα (inverter), ο οποίος το μετατρέπει σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) (Al-Ezzi, 2022).



Εικόνα 6 Τα βασικά στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Πηγή: (Al-Ezzi, 2022).

Η πλειονότητα των εμπορικών φωτοβολταϊκών συστημάτων βασίζεται σε τεχνολογίες πρώτης γενιάς, δηλαδή στο κρυσταλλικό πυρίτιο. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια χαρακτηρίζονται από υψηλή καθαρότητα υλικού και παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποδόσεις, οι οποίες σε εμπορικό επίπεδο προσεγγίζουν το 26–27%, με επιβεβαιωμένες εργαστηριακές τιμές έως 27,6%. Παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, αλλά συνοδεύονται από υψηλότερο κόστος παραγωγής. Τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια εμφανίζουν χαμηλότερες αποδόσεις, προσφέρουν όμως ευνοϊκότερη σχέση κόστους–απόδοσης, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα διαδεδομένα σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (Al-Ezzi, 2022· Lazaroïu et al., 2023).

Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες δεύτερης γενιάς λεπτής μεμβράνης, όπως CdTe, CIGS και άμορφο πυρίτιο, οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με το κρυσταλλικό πυρίτιο, αλλά πλεονεκτούν σε χαμηλότερο κόστος παραγωγής, μειωμένο βάρος και αυξημένη ευελιξία ως προς τη μορφή και τις επιφάνειες εγκατάστασης. Οι τεχνολογίες τρίτης και τέταρτης γενιάς, όπως οι περοβσκίτες, οι πολυσυνδεδεμένες (tandem) κυψέλες και οι οργανικές φωτοβολταϊκές διατάξεις, βρίσκονται σε στάδιο εντατικής έρευνας και ανάπτυξης, με εργαστηριακές αποδόσεις που ξεπερνούν το 40%, αναδεικνύοντας το σημαντικό μελλοντικό δυναμικό της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας (Lazaroïu et al., 2023).

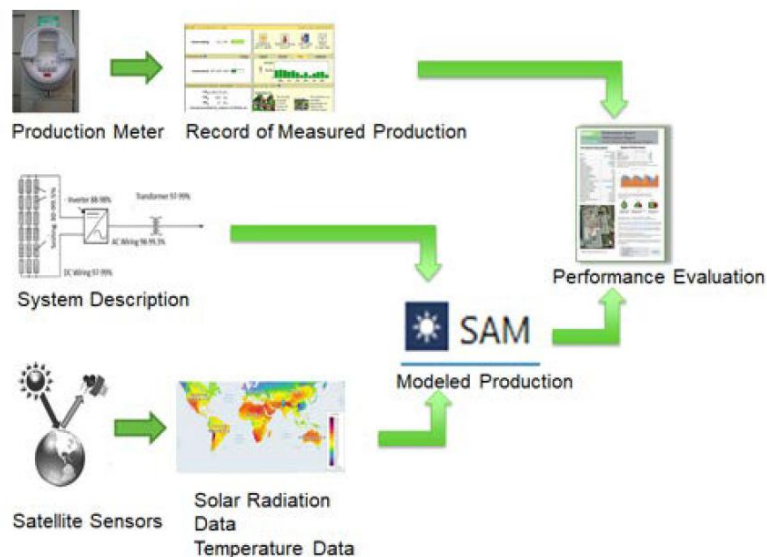
### 3.2.4 Δομή φωτοβολταϊκών συστημάτων και πραγματική ενεργειακή απόδοση

Ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει, πέρα από τα πάνελ και τον αντιστροφέα, ηλεκτρικά καλώδια, διατάξεις προστασίας και, σε πολλές περιπτώσεις, στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας, όπως συσσωρευτές ή υπερπυκνωτές. Η ενσωμάτωση αποθήκευσης συμβάλλει στην αντιμετώπιση της διαλείπουσας φύσης της ηλιακής παραγωγής, επιτρέποντας την καλύτερη αντιστοίχιση μεταξύ παραγωγής και ζήτησης και αυξάνοντας την ευελιξία και την αξιοπιστία του συστήματος (Dada et al., 2023).

Παρά τις υψηλές θεωρητικές αποδόσεις των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών, στην πράξη παρατηρούνται συχνά σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικά μετρούμενης παραγωγής ενέργειας. Σύμφωνα με μελέτη του National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2022), η οποία ανέλυσε 75 φωτοβολταϊκά συστήματα στις Ηνωμένες Πολιτείες συνολικής ισχύος άνω των 30 MW, ο δείκτης απόδοσης κυμάνθηκε από 46% έως 105%, με μέση τιμή περίπου 78,6%. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται σε πληθώρα παραγόντων, όπως οι θερμικές απώλειες λόγω αυξημένων θερμοκρασιών λειτουργίας, οι αποκλίσεις της πραγματικής ηλιακής ακτινοβολίας από τα θεωρητικά δεδομένα, οι απώλειες

στο DC και AC τμήμα του συστήματος, ο μη ιδανικός προσανατολισμός και η γωνία κλίσης, η ρύπανση και η σκίαση των πάνελ, η γήρανση των υλικών και διάφορα λειτουργικά ή συντηρητικά ζητήματα.

Για την αύξηση της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης, έχουν αναπτυχθεί συστήματα ηλιακής παρακολούθησης, τα οποία προσαρμόζουν δυναμικά τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πάνελ ώστε να ακολουθούν τη θέση του ήλιου. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι ενεργά ή παθητικά, μονού ή διπλού άξονα, καθώς και ανοιχτού ή κλειστού βρόχου. Παρότι αυξάνουν την παραγόμενη ενέργεια, συνεπάγονται υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, γεγονός που καθιστά την οικονομική τους αποδοτικότητα αντικείμενο συνεχιζόμενης έρευνας (Dada et al., 2023).



Εικόνα 7 Μεθοδολογία αξιολόγησης της απόδοσης για τη σύγκριση δεδομένων πραγματικής μετρούμενης παραγωγής με υπολογιστικά μοντέλα που βασίζονται στην περιγραφή του συστήματος και σε κλιματικά δεδομένα. Εικονογράφηση από τον Andy Walker, NREL (Πηγή: (NREL, 2022)

### 3.2.5 Βελτιστοποίηση λειτουργίας, ψηφιακές τεχνολογίες και βιωσιμότητα

Ιδιαίτερη δυναμική παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια η ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης, μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης στον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μη γραμμικοί ελεγκτές βασισμένοι σε AI έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικοί σε εφαρμογές κλειστού βρόχου, επιτρέποντας τη γρήγορη προσαρμογή παραμέτρων λειτουργίας και την αύξηση της συνολικής απόδοσης. Παράλληλα, αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση απωλειών λόγω ρύπανσης, θερμοκρασιακών μεταβολών ή σκίασης και για τη βελτιστοποίηση των

διαδικασιών καθαρισμού των πάνελ, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη σκόνη ή δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες (Vodapally & Ali, 2023).

Τέλος, η ραγδαία εξάπλωση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων αναδεικνύει τη σημασία της βιωσιμότητας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των συστημάτων. Με δεδομένη τη μέση διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πάνελ, που ανέρχεται σε περίπου 25 έτη, αναμένεται σημαντική αύξηση των αποβλήτων στο τέλος ζωής τους. Η ανάλυση της αλυσίδας αξίας των φωτοβολταϊκών, από τον σχεδιασμό και την παραγωγή έως τη χρήση και την ανακύκλωση, καταδεικνύει την ανάγκη ενσωμάτωσης αρχών κυκλικής οικονομίας, όπως ο σχεδιασμός για ανακύκλωση, η επαναχρησιμοποίηση υλικών και η ανάπτυξη βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων, ώστε να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας (Franco, 2021).

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Πολυκριτηριακή Ανάλυση και Μέθοδος

### Promethee

#### 4.1. Πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων

##### 4.1.1. Γενικά στοιχεία

Η λήψη αποφάσεων αποτελεί μια σύνθετη γνωστική και αναλυτική διαδικασία, η οποία αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από την ταυτόχρονη ύπαρξη πολλαπλών, συχνά αντικρουόμενων, κριτηρίων αξιολόγησης. Σε τέτοιου είδους προβλήματα, η κλασική μονοκριτηριακή προσέγγιση αποδεικνύεται ανεπαρκής, καθώς αδυνατεί να αποτυπώσει την πολυδιάστατη φύση της απόφασης και τις αναπόφευκτες αντισταθμίσεις μεταξύ διαφορετικών διαστάσεων απόδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (Multicriteria Decision Analysis – MCDA), γνωστή επίσης ως Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (Multicriteria Decision Making – MCDM), έχει αναπτυχθεί ως ένα συστηματικό και δομημένο επιστημονικό πλαίσιο για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε πολύπλοκα προβλήματα.

Η MCDA δεν αποτελεί μία και μοναδική μέθοδο, αλλά ένα σύνολο θεωρητικών αρχών, μαθηματικών μοντέλων και αναλυτικών τεχνικών που στοχεύουν στη συγκριτική αξιολόγηση ενός συνόλου εναλλακτικών λύσεων με βάση περισσότερα του ενός κριτήρια. Κεντρικός της στόχος είναι η ενσωμάτωση των προτιμήσεων του υπεύθυνου ή των υπευθύνων λήψης αποφάσεων (decision-makers) στη διαδικασία αξιολόγησης, με τρόπο διαφανή, αναπαραγώγιμο και συνεπή. Όπως επισημαίνεται στη σύγχρονη βιβλιογραφία, η MCDA λειτουργεί πρωτίστως ως εργαλείο υποστήριξης και όχι αυτοματοποιημένης αντικατάστασης της ανθρώπινης κρίσης, προσφέροντας μια ορθολογική δομή μέσα στην οποία μπορούν να αναλυθούν και να σταθμιστούν οι διαφορετικές διαστάσεις ενός προβλήματος (Cinelli et al., 2020· Bonakdari et al., 2025).

Η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων μπορεί να ερμηνευθεί με περισσότερους από έναν τρόπους, ανάλογα με τον σκοπό της ανάλυσης και τη φύση του προβλήματος. Σε μια πρώτη και συνηθέστερη ερμηνεία, η MCDA αποσκοπεί στην επιλογή της βέλτιστης ή περισσότερο προτιμώμενης εναλλακτικής λύσης από ένα σύνολο διαθέσιμων επιλογών. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε προβλήματα επιλογής, όπου ζητούμενο είναι η ανάδειξη μίας και μόνο λύσης ως καταλληλότερης. Σε μια δεύτερη ερμηνεία, η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μηχανισμός ομαδοποίησης ή ταξινόμησης των εναλλακτικών λύσεων σε κατηγορίες προτίμησης, επιτρέποντας την

επιλογή ενός μικρότερου και διαχειρίσιμου υποσυνόλου λύσεων για περαιτέρω ανάλυση ή εφαρμογή. Τέλος, μια τρίτη θεμελιώδης ερμηνεία αφορά τον εντοπισμό των μη κυριαρχούμενων ή αποδοτικών (efficient) εναλλακτικών λύσεων, δηλαδή εκείνων που δεν υστερούν ταυτόχρονα σε όλα τα κριτήρια σε σύγκριση με κάποια άλλη εναλλακτική (Taherdoost & Madanchian, 2023).

Η έννοια της κυριαρχίας κατέχει κεντρική θέση στη θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μια εναλλακτική λύση χαρακτηρίζεται ως κυριαρχούμενη όταν υπάρχει τουλάχιστον μία άλλη λύση που παρουσιάζει ίση ή καλύτερη απόδοση σε όλα τα κριτήρια και αυστηρά καλύτερη απόδοση σε τουλάχιστον ένα από αυτά. Αντίστροφα, οι μη κυριαρχούμενες λύσεις συνιστούν το σύνολο των εφικτών επιλογών μεταξύ των οποίων δεν είναι δυνατόν να μεταβεί κανείς από τη μία στην άλλη χωρίς να θυσιάσει τουλάχιστον ένα κριτήριο απόδοσης. Το σύνολο αυτό παρέχει ένα κρίσιμο γνωστικό εργαλείο στους υπευθύνους λήψης αποφάσεων, καθώς περιορίζει τον χώρο αναζήτησης σε λύσεις που είναι θεωρητικά αποδοτικές και δικαιολογήσιμες (Bonakdari et al., 2025).

Σε επίπεδο λογικής, η διαδικασία λήψης αποφάσεων περιλαμβάνει έξι διακριτά και αλληλένδετα στάδια που μιμούνται τους περίπλοκους και εξελιγμένους μηχανισμούς επεξεργασίας πληροφοριών του ανθρώπινου εγκεφάλου. Αυτά τα στάδια συνεργάζονται για να αναπαράγουν τον τρόπο με τον οποίο οι εγκεφαλοί μας ερμηνεύουν, αναλύουν και ανταποκρίνονται σε πολύπλοκα ερεθίσματα. Κάθε φάση παίζει κρίσιμο ρόλο στον γνωστικό μηχανισμό, αντανακλώντας τον περίπλοκο χορό των συνάψεων και των νευρώνων καθώς επεξεργάζονται την τεράστια ποσότητα δεδομένων που συναντάμε, αναλύοντάς τα σε εφαρμόσιμες γνώσεις και σκόπιμες επιλογές.

### **Ανάκτηση δεδομένων**

Δεδομένης της πεπερασμένης ικανότητας επεξεργασίας του νου, ανακτά επιλεκτικά τις πιο σχετικές πληροφορίες για ανάλυση. Αυτό το φιλτράρισμα διασφαλίζει ότι οι γνωστικοί πόροι κατανέμονται αποτελεσματικά, εστιάζοντας στα δεδομένα που θα επηρεάσουν σημαντικά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

### **Αναγνώριση**

Σε αυτό το σημείο, ο εγκεφαλος εργάζεται για να προσδιορίσει την ουσία των επεξεργασμένων πληροφοριών. Διακρίνει τα σχετικά δεδομένα από τα ασήμαντα, όπως ακριβώς και η διερεύνηση σημάτων για την απομόνωση ενός σαφούς μοτίβου ή μηνύματος.

### **Σκέψη**

Αυτή η φάση περιλαμβάνει τη σύνθεση των προσδιορισμένων πληροφοριών με τις συσσωρευμένες γνώσεις και ικανότητες του ατόμου. Είναι ένας περίπλοκος συνδυασμός

νέων δεδομένων με υπάρχοντες γνωστικούς χάρτες, θέτοντας το σκηνικό για την επίλυση προβλημάτων και την καινοτόμο σκέψη.

### **Κρίση**

Εδώ, ο νους δημιουργεί πιθανές εναλλακτικές λύσεις και καθορίζει κριτήρια για την αξιολόγησή τους. Αυτό το στάδιο είναι καθοριστικό, καθώς θέτει τις βάσεις για την αναγνώριση της καταλληλότερης πορείας δράσης, ευθυγραμμίζοντας τις επιλογές με τους στόχους και τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

### **Αξιολόγηση**

Οι εναλλακτικές λύσεις συγκρίνονται σχολαστικά με τα καθορισμένα κριτήρια. Αυτή η σύγκριση μπορεί να είναι ανά ζεύγη ή συλλογική, ανάλογα με την πολυπλοκότητα της απόφασης. Στόχος είναι να αξιολογηθούν αντικειμενικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε επιλογής για να διαπιστωθεί η βιωσιμότητά τους.

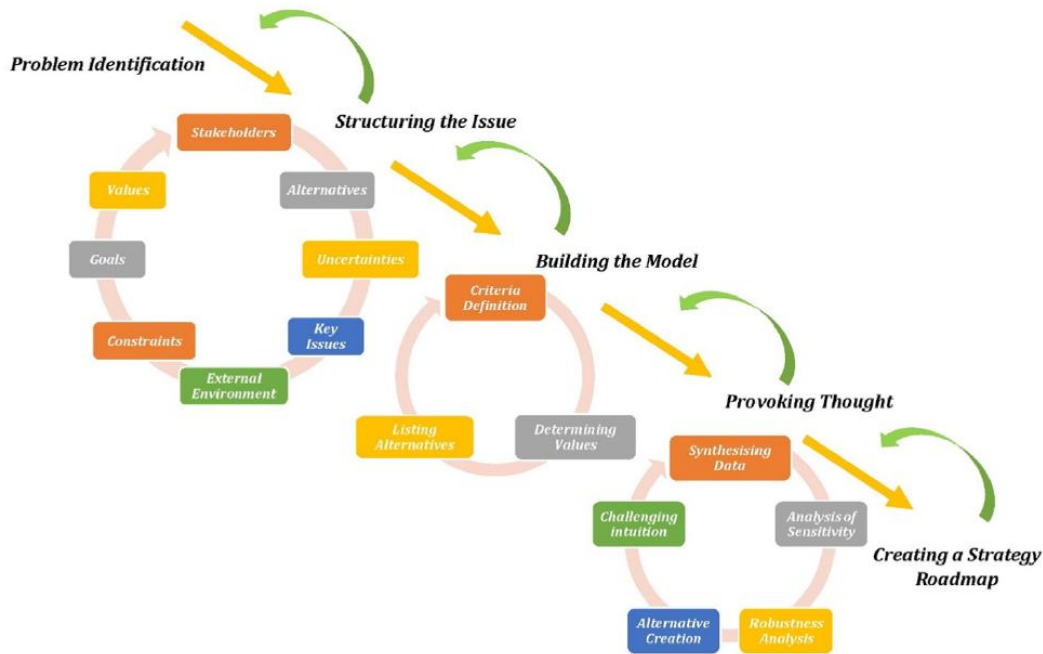
### **Απόφαση**

Καταλήγοντας στη διαδικασία, επιλέγονται οι πιο ικανοποιητικές επιλογές. Οι επιλεγμένες εναλλακτικές λύσεις στη συνέχεια ταξινομούνται με βάση την προτεραιότητα, καθορίζοντας μια σαφή οδηγία για δράση που ευθυγραμμίζεται με τους στόχους του ατόμου και το πλαίσιο της κατάστασης.



Εικόνα 8 Η διαδικασία λήψης απόφασης (Πηγή: (Bonakdari , 2024)

Συχνά, η διαδικασία MCDM ενσωματώνεται σε μια ευρύτερη διαδικασία που ξεκινά με τον ορισμό ενός προβλήματος, στη συνέχεια τη δομή του, τη μοντελοποίησή του και τη χρήση του μοντέλου για την αμφισβήτηση της σκέψης, οδηγώντας τελικά στη διαμόρφωση ενός σχεδίου δράσης Τα κύρια στάδια αυτής της διαδικασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 1.3.



Εικόνα 9 Απεικόνιση της διαδικασίας πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων. (Πηγή: (Bonakdari , 2024)

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων στην επίλυση προβλημάτων μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά στάδια: «Εντοπισμός και Δόμηση Προβλήματος», «Δημιουργία Μοντέλου και Λύση» και «Ανάπτυξη Σχεδίου Δράσης». (Bonakdari et al., 2025).

Σε μαθηματικό επίπεδο, ένα τυπικό πρόβλημα πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων ορίζεται μέσω ενός διακριτού και πεπερασμένου συνόλου εναλλακτικών λύσεων.

$$A = \{A_i \mid i = 1, 2, \dots, m\},$$

όπου  $m$  είναι ο συνολικός αριθμός των εξεταζόμενων επιλογών.

Οι εναλλακτικές αυτές αξιολογούνται ως προς ένα σύνολο κριτηρίων

$$C = \{C_j \mid j = 1, 2, \dots, n\},$$

όπου  $n$  αντιστοιχεί στον αριθμό των κριτηρίων.

Τα κριτήρια δεν απαιτείται να είναι ομοιογενή ως προς τη φύση ή τις μονάδες μέτρησης και συχνά εκφράζουν αντικρουόμενους στόχους, όπως η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους και μεγιστοποίηση της απόδοσης.

Σε κάθε κριτήριο αποδίδεται ένα βάρος  $w_j$ , σχηματίζοντας το σύνολο βαρών

$$W = \{w_j \mid j = 1, 2, \dots, n\},$$

το οποίο εκφράζει τη σχετική σημασία των κριτηρίων και συνήθως κανονικοποιείται ώστε το άθροισμα των βαρών να ισούται με τη μονάδα.

Οι πληροφορίες αυτές οργανώνονται στον πίνακα απόφασης  $M = [x_{ij}]$ , όπου κάθε στοιχείο  $x_{ij}$  αντιπροσωπεύει την απόδοση της εναλλακτικής  $A_i$  ως προς το κριτήριο  $C_j$ .

| MCDM Matrix | $C_1$    | $C_2$    | ...      | $C_n$    |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| $A_1$       | $x_{11}$ | $x_{12}$ | ...      | $x_{1n}$ |
| $A_2$       | $x_{21}$ | $x_{22}$ | ...      | $x_{2n}$ |
| ...         | ...      | ...      | $x_{ij}$ | ...      |
| $A_m$       | $x_{m1}$ | $x_{m2}$ | ...      | $x_{mn}$ |

Εικόνα 10 Πίνακας MCDM (Πηγή: (Taherdoost, 2023))

Σε αυτόν τον πίνακα,

το  $x_{ij}$  αντιπροσωπεύει την τιμή του  $A_i$  σε σχέση με το  $C_j$ , και ο πίνακας ( $M$ ) και το διάνυσμα βαρών ( $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ) είναι οι βασικές είσοδοι για τα προβλήματα MCDM.

Στην πραγματικότητα, το MCDM βαθμολογεί τις εναλλακτικές λύσεις και τις ταξινομεί με βάση την καλύτερη προς τη χειρότερη.

Ο πίνακας απόφασης, σε συνδυασμό με το διάνυσμα βαρών, αποτελεί τη βασική είσοδο για τις περισσότερες μεθόδους MCDA και επιτρέπει τη συστηματική σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων. Ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται, οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα μπορούν να αναδιαταχθούν ή να μετασχηματιστούν, χωρίς ωστόσο να αλλοιώνεται η θεμελιώδης πληροφοριακή του δομή (Taherdoost & Madanchian, 2023).

Η MCDA έχει εφαρμοστεί εκτενώς σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών και τεχνολογικών πεδίων, ιδίως σε τομείς όπου οι αποφάσεις χαρακτηρίζονται από υψηλή πολυπλοκότητα και σημαντικές κοινωνικοοικονομικές ή περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στον χώρο της μηχανικής και των έργων υποδομής, η πολυκριτηριακή ανάλυση χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνικών λύσεων, τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων, τη διαχείριση φυσικών πόρων και τον σχεδιασμό βιώσιμων συστημάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ικανότητα της MCDA να ενσωματώνει ετερογενή δεδομένα, ποσοτικά και ποιοτικά, καθώς και να αποτυπώνει τις προτιμήσεις διαφορετικών εμπλεκόμενων φορέων σε ένα ενιαίο αναλυτικό πλαίσιο (Bonakdari et al., 2025).

Συνοψίζοντας, η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων συνιστά ένα ώριμο και ευέλικτο επιστημονικό πεδίο, το οποίο παρέχει τα θεωρητικά και μεθοδολογικά εργαλεία για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Μέσω της σαφούς μαθηματικής διατύπωσης, της συστηματικής αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων και της ενσωμάτωσης

των προτιμήσεων των υπευθύνων λήψης αποφάσεων, η MCDA συμβάλλει ουσιαστικά στη διαμόρφωση τεκμηριωμένων, διαφανών και ορθολογικών αποφάσεων.

#### **4.1.2. Μέθοδοι Πολυκριτηριακής Ανάλυση Αποφάσεων**

Σύμφωνα με τους Bonakdari et al., 2025 , η κατάταξη των Μεθόδων Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων έχει ως ακολούθως:

##### **Μέθοδοι βαθμολόγησης (Scoring methods)**

Οι μέθοδοι βαθμολόγησης στο πλαίσιο MCDM περιλαμβάνουν την αξιολόγηση κάθε εναλλακτικής λύσης με βάση την απόδοσή της σε διάφορα κριτήρια. Κάθε εναλλακτική λύση βαθμολογείται για κάθε κριτήριο. Αυτές οι βαθμολογίες στη συνέχεια αθροίζονται για να σχηματίσουν μια συνολική βαθμολογία για κάθε εναλλακτική λύση. Η συγκέντρωση μπορεί να είναι ένα απλό άθροισμα ή μια πιο σύνθετη συνάρτηση, όπως ένα σταθμισμένο άθροισμα, όπου σε διαφορετικά κριτήρια δίνονται διαφορετικά επίπεδα σημασίας με βάση τη συνάφειά τους με τους στόχους λήψης αποφάσεων. Παραδείγματα μεθόδων βαθμολόγησης περιλαμβάνουν την απλή προσθετική στάθμιση (SAW) (Afshari et al., 2010), επίσης γνωστή ως μοντέλο σταθμισμένου αθροίσματος, και το μοντέλο σταθμισμένου προϊόντος (WPM) (AlAli et al., 2023).

##### **Συμβιβαστικές μέθοδοι (Compromising methods)**

Οι συμβιβαστικές μέθοδοι στο MCDM αντιπροσωπεύουν μια εξελιγμένη προσέγγιση όπου οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων στοχεύουν στον εντοπισμό μιας εναλλακτικής λύσης που επιτυγχάνει μια βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ανταγωνιστικών κριτηρίων. Αυτή η ισορροπία συνήθως επιτυγχάνεται αντιπαραβάλλοντας κάθε εναλλακτική λύση με τις «ιδανικές» και «μη ιδανικές» λύσεις - θεωρητικές κατασκευές που αντιπροσωπεύουν τα καλύτερα και τα χειρότερα δυνατά αποτελέσματα, αντίστοιχα (Chen, 2000; Noori et al., 2018). Σε αυτήν την προσέγγιση, η σχετική εγγύτητα κάθε εναλλακτικής λύσης με αυτές τις ιδανικές λύσεις ποσοτικοποιείται, συνήθως υπολογίζοντας τις γεωμετρικές ή άλλες μορφές αποστάσεων τους από το ιδανικό και το μη ιδανικό σημείο. Η εναλλακτική λύση που είναι πιο κοντά στην ιδανική λύση και πιο μακριά από τη μη ιδανική λύση θεωρείται στη συνέχεια ο καλύτερος συμβιβασμός. Τεχνικές όπως η TOPSIS (Τεχνική Προτίμησης Τάξης με Ομοιότητα προς την Ιδανική Λύση) και η VIKOR (VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje, που σημαίνει «πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση και συμβιβαστική λύση») (Opricovic & Tzeng, 2004) αποτελούν εξέχοντα παραδείγματα μεθόδων συμβιβασμού.

## Μέθοδοι Συμφωνίας (Concordance methods)

Οι τεχνικές συναίνεσης στην MCDM επικεντρώνονται στις δυαδικές σχέσεις μεταξύ εναλλακτικών λύσεων, αξιολογώντας συστηματικά ζεύγη εναλλακτικών λύσεων η μία έναντι της άλλης σε όλα τα κριτήρια (Filatovas et al., 2022). Με αυτόν τον τρόπο, αυτές οι μέθοδοι μπορούν να καταγράψουν το βάθος και τις λεπτότητες της προτίμησης μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων με τρόπο που οι μεμονωμένες μέθοδοι βαθμολόγησης μπορεί να μην το κάνουν. Ο απώτερος στόχος είναι η επίτευξη συναίνεσης σχετικά με την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, προσδιορίζοντας ποιες είναι οι πλέον προτιμώμενες σε ολόκληρη την ομάδα λήψης αποφάσεων. Από την ομάδα συναίνεσης, αξιοσημείωτες τεχνικές περιλαμβάνουν την ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalite', που σημαίνει Εξάλειψη και Επιλογή Έκφραση Πραγματικότητας) και την PROMETHEE (Οργανισμός Κατάταξης Προτιμήσεων ΜΕΘΟΔΟΣ για Αξιολογήσεις Εμπλουτισμού).

## Συγκριτική μέθοδος (Comparative method)

Οι συγκριτικές μέθοδοι στο MCDM χαρακτηρίζονται από τη χρήση πινάκων σύγκρισης ανά ζεύγη για τον προσδιορισμό της σειράς προτίμησης των εναλλακτικών λύσεων. Κάθε εναλλακτική λύση συγκρίνεται απευθείας με κάθε άλλη εναλλακτική λύση, σε σχέση με κάθε κριτήριο. Αυτές οι συγκρίσεις συχνά βασίζονται στη σχετική σημασία ή προτίμηση των ίδιων των κριτηρίων, τα οποία συνήθως αξιολογούνται επίσης χρησιμοποιώντας συγκρίσεις ανά ζεύγη. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συγκριτικής μεθόδου είναι η αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (AHP), που αναπτύχθηκε από τον Thomas L. Saaty (Saaty, 2004).

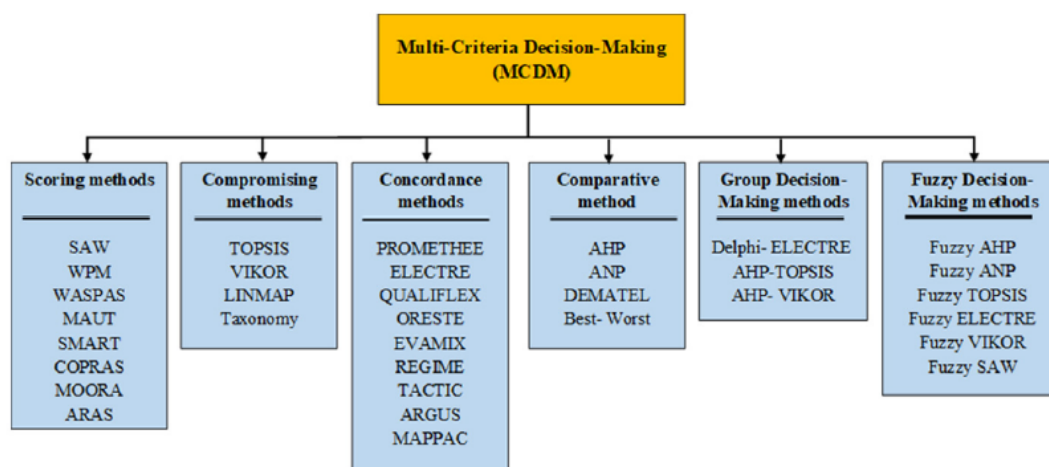


Figure 1.6 Classification of compensatory methods of MCDM.

Εικόνα 11 Ταξινόμηση των αντισταθμιστικών μεθόδων της πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων (MCDM). (Πηγή: (Bonakdari , 2024)

Ακολουθώς παρατίθεται σύντομη περιγραφή των σημαντικότερων μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης σύμφωνα με τους Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023).

|           |                                                                                                                                                |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AHP       | Σύγκριση ιεραρχικών κριτηρίων ανά ζεύγη λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες διαφορών.                                                            |
| DEA       | Αξιολόγηση απόδοσης ενός συνόλου ομοιογενών μονάδων DM με πολλαπλές εισόδους και εξόδους                                                       |
| FST       | Ποσοτικοποίηση της γλωσσικής πτυχής των προσβάσιμων δεδομένων και προτιμήσεων για την αντιμετώπιση υποκειμενικών και διφορούμενων προβλημάτων. |
| TOPSIS    | Αξιολόγηση με βάση την απόσταση της εναλλακτικής λύσης από την ιδανική λύση.                                                                   |
| GP        | Ελαχιστοποίηση της εξαγωγής κάθε στόχου από τον επιθυμητό στόχο μαζί με βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων                                        |
| CBR       | Διατύπωση συστάσεων χρησιμοποιώντας την ανάλυση των ιστορικών δεδομένων                                                                        |
| GRA/GRM   | Διαχωρισμός πληροφοριών σε λευκό, μαύρο και γκρι (μεταξύ γνωστού και αγνώστου).                                                                |
| ANP       | Μη γραμμικός και πιο γενικός τύπος AHP χρησιμοποιώντας συγκεντρωτική ανάλυση βασισμένη σε αλυσίδα Markov.                                      |
| FUZZY AHP | AHP με ασαφή αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων.                                                                                               |
| ELECTRE   | Υπεροχή της σχέσης των εναλλακτικών λύσεων και χρήση σύγκρισης ανά ζεύγη.                                                                      |
| PROMETHEE | Μέθοδος υπεροχής (όπως ELECTRE) που περιλαμβάνει                                                                                               |

|              |                                                                                                                                                                             |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | αρκετές επαναλήψεις.                                                                                                                                                        |
| VIKOR        | Μια αντισταθμιστική έκδοση του TOPSIS που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της απόστασης από την ιδανική λύση χρησιμοποιώντας μια γραμμική προσέγγιση κανονικοποίησης.         |
| FUZZY TOPSIS | Βασίζεται στο TOPSIS σε ασαφές περιβάλλον                                                                                                                                   |
| DEMATEL      | Επαλήθευση σχέσεων/αλληλεξάρτησης μεταξύ μεταβλητών.                                                                                                                        |
| PRAGMA       | Σύγκριση μερικών προφίλ εναλλακτικών λύσεων λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιθανά ζεύγη κριτηρίων.                                                                                |
| SAW          | Περιλαμβάνει μια απλή πρόσθεση βαθμολογιών που αντιπροσωπεύουν τα επιτεύγματα στόχων λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια, η οποία πολλαπλασιάζεται με τα βάρη των κριτηρίων.  |
| MAUT         | Με βάση την ενσωμάτωση παραγόντων αβεβαιότητας και προτιμήσεων κινδύνου σε μεθόδους υποστήριξης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων.                                              |
| BWM          | Προσδιορισμός των καλύτερων και των χειρότερων κριτηρίων, ακολουθούμενη από διεξαγωγή συγκρίσεων ανά ζεύγη μεταξύ καθενός από τα καλύτερα και χειρότερα κριτήρια και άλλων. |
| SMART        | στάθμιση των κριτηρίων με βάση τη σημασία τους και μετατροπή των βαρών σπουδαιότητας σε πραγματικούς αριθμούς.                                                              |
| Fuzzy ANP    | Ασαφής έκφραση βαρών κριτηρίων στη μέθοδο ANP.                                                                                                                              |

Εικόνα 12 Περιγραφή των βασικών μεθόδων MCDM (Πηγή: (Taherdoost , 2023)

## 4.2. Η μέθοδος Promethee

### 4.2.1 Γενικά στοιχεία

Σύμφωνα με τους Bonakdari et al., 2025, η τεχνική PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHOD for Enrichment Evaluation) προτάθηκε αρχικά από τον Brans το 1982 και αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες πολυκριτηριακές μεθόδους υποστήριξης αποφάσεων. Βασικό της χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα αποτύπωσης της έντασης των προτιμήσεων μεταξύ εναλλακτικών λύσεων, αποφεύγοντας τη δυαδική λογική «προτιμάται ή δεν προτιμάται» που συναντάται σε πιο παραδοσιακές προσεγγίσεις.

Για τον σκοπό αυτό, η μέθοδος εισάγει έξι διαφορετικούς τύπους συναρτήσεων προτίμησης, οι οποίες επιτρέπουν τη βαθμιαία μετάβαση των προτιμήσεων σε τιμές μεταξύ 0 και 1. Οι συναρτήσεις αυτές επιλέγονται από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων ανάλογα με τη φύση και τα χαρακτηριστικά κάθε κριτηρίου, προσδίδοντας στη μέθοδο υψηλό βαθμό ευελιξίας και προσαρμοστικότητας. Οι συναρτήσεις προτίμησης περιλαμβάνουν τη συνήθη συνάρτηση, τις συναρτήσεις σχήματος U και V, τη συνάρτηση επιπέδου, τη γραμμική και τη Γκαουσιανή συνάρτηση, καθεμία εκ των οποίων είναι κατάλληλη για διαφορετικά σενάρια λήψης αποφάσεων.

Η χρήση αυτών των συναρτήσεων επιτρέπει τη μοντελοποίηση σύνθετων συμπεριφορών προτίμησης. Για παράδειγμα, η συνάρτηση σχήματος V είναι κατάλληλη όταν μικρές διαφορές μεταξύ εναλλακτικών θεωρούνται αμελητέες έως ότου ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο κατώφλι, ενώ η Γκαουσιανή συνάρτηση αποτυπώνει ομαλές και σταδιακές μεταβολές στην ένταση της προτίμησης. Με αυτόν τον τρόπο, η PROMETHEE επιτυγχάνει μια πιο ρεαλιστική και λεπτομερή αναπαράσταση των προτιμήσεων του αποφασίζοντα.

Ένα ακόμη κεντρικό στοιχείο της μεθόδου είναι η αξιοποίηση της έννοιας του ψευδοκριτηρίου, η οποία διευκολύνει την ποσοτικοποίηση ποιοτικών κριτηρίων. Μέσω του ψευδοκριτηρίου εισάγονται όρια αδιαφορίας και προτίμησης, τα οποία επιτρέπουν την ενσωμάτωση υποκειμενικών κρίσεων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το όριο αδιαφορίας καθορίζει το εύρος των διαφορών που θεωρούνται αμελητέες, ενώ το όριο προτίμησης προσδιορίζει το σημείο πέρα από το οποίο μια εναλλακτική υπερισχύει ξεκάθαρα έναντι μιας άλλης.

Η ενσωμάτωση αυτής της έννοιας καθιστά περιττή την κανονικοποίηση των κριτηρίων, η οποία συχνά απαιτείται σε άλλες πολυκριτηριακές μεθόδους για τη σύγκριση διαφορετικών μονάδων μέτρησης. Η αποφυγή της κανονικοποίησης όχι μόνο απλοποιεί τη διαδικασία

ανάλυσης, αλλά συμβάλλει και στη διατήρηση της αρχικής ακεραιότητας των δεδομένων, καθιστώντας τη διαδικασία πιο διαφανή και εύληπτη.

Συνολικά, η μέθοδος PROMETHEE προσφέρει ένα ευέλικτο και ισχυρό πλαίσιο πολυκριτηριακής ανάλυσης, το οποίο συνδυάζει την έννοια της υπερίσχυσης με προηγμένα εργαλεία μοντελοποίησης προτιμήσεων. Η δυνατότητα αποτύπωσης της έντασης των προτιμήσεων, η χρήση ψευδοκριτηρίων και η αποφυγή κανονικοποίησης καθιστούν τη μέθοδο ιδιαίτερα κατάλληλη για πολύπλοκα προβλήματα λήψης αποφάσεων που περιλαμβάνουν τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά κριτήρια.

#### **4.2.2 Βασικά βήματα εφαρμογής της μεθόδου PROMETHEE**

Η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE ακολουθεί μια δομημένη και συστηματική διαδικασία, η οποία διασφαλίζει τη συνεπή και αξιόπιστη αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων. Τα βασικά στάδια της διαδικασίας περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

##### **Ορισμός του προβλήματος και των κριτηρίων απόφασης**

Στο αρχικό στάδιο, προσδιορίζεται με σαφήνεια το πρόβλημα λήψης αποφάσεων και καταγράφονται όλες οι εναλλακτικές λύσεις που πρόκειται να αξιολογηθούν. Οι εναλλακτικές αυτές αντιπροσωπεύουν τις διαθέσιμες επιλογές του αποφασίζοντα και θα αποτελέσουν το αντικείμενο της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Παράλληλα, καθορίζονται τα κριτήρια απόφασης, τα οποία εκφράζουν τις διαστάσεις βάσει των οποίων θα αξιολογηθούν οι εναλλακτικές λύσεις. Τα κριτήρια πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά και να καλύπτουν όλες τις κρίσιμες πτυχές του προβλήματος, ώστε να διασφαλίζεται μια ολοκληρωμένη και αντικειμενική αξιολόγηση.

##### **Κατασκευή του πίνακα αξιολόγησης**

Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ο πίνακας αξιολόγησης, στον οποίο αποτυπώνονται οι επιδόσεις κάθε εναλλακτικής λύσης ως προς κάθε κριτήριο. Ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει ποσοτικές ή ποιοτικές τιμές, οι οποίες εκφράζουν τον βαθμό στον οποίο κάθε εναλλακτική ικανοποιεί τα επιμέρους κριτήρια. Ο πίνακας αξιολόγησης αποτελεί τη βασική είσοδο δεδομένων για την περαιτέρω εφαρμογή της μεθόδου.

##### **Κανονικοποίηση του πίνακα αξιολόγησης (εφόσον απαιτείται)**

Σε περιπτώσεις όπου τα κριτήρια εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες μέτρησης ή κλίμακες, ενδέχεται να απαιτείται κανονικοποίηση των τιμών του πίνακα αξιολόγησης, προκειμένου να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των δεδομένων. Η κανονικοποίηση μπορεί

να πραγματοποιηθεί με τη χρήση διαφόρων τεχνικών, αν και στη μέθοδο PROMETHEE η ανάγκη αυτή συχνά περιορίζεται λόγω της χρήσης συναρτήσεων προτίμησης και ψευδοκριτηρίων.

### **Προσδιορισμός των βαρών των κριτηρίων**

*Ένα κρίσιμο στάδιο της διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός των βαρών των κριτηρίων, τα οποία εκφράζουν τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου στη συνολική απόφαση. Τα βάρη μπορούν να καθοριστούν με διάφορες μεθόδους, όπως μέσω της γνώμης ειδικών, ερωτηματολογίων, ή αναλυτικών τεχνικών υποστήριξης αποφάσεων. Η σωστή ανάθεση των βαρών είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς επηρεάζει άμεσα την τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.*

### **Υπολογισμός των συναρτήσεων προτίμησης**

Ακολουθώντας, για κάθε ζεύγος εναλλακτικών λύσεων και για κάθε κριτήριο, υπολογίζεται η συνάρτηση προτίμησης, η οποία αποτυπώνει τον βαθμό προτίμησης της μίας εναλλακτικής έναντι της άλλης. Οι συναρτήσεις προτίμησης μπορεί να λάβουν διαφορετικές μορφές, όπως η συνήθης, η συνάρτηση σχήματος U, η συνάρτηση σχήματος V ή η συνάρτηση επιπέδου, ανάλογα με τη φύση του κριτηρίου και τις προτιμήσεις του υπευθύνου λήψης αποφάσεων. Το στάδιο αυτό επιτρέπει την ποσοτικοποίηση τόσο ποσοτικών όσο και ποιοτικών διαφορών μεταξύ των εναλλακτικών.

### **Υπολογισμός των ροών υπεροχής**

*Με βάση τους δείκτες προτίμησης, υπολογίζονται οι ροές υπεροχής για κάθε εναλλακτική λύση. Η θετική ροή υπεροχής (ροή εξόδου) εκφράζει τον βαθμό στον οποίο μια εναλλακτική υπερισχύει έναντι των υπολοίπων, ενώ η αρνητική ροή υπεροχής (ροή εισόδου) αποτυπώνει τον βαθμό στον οποίο η συγκεκριμένη εναλλακτική υπερισχύεται από τις άλλες. Οι ροές αυτές παρέχουν μια σαφή εικόνα της σχετικής θέσης κάθε εναλλακτικής στο σύνολο των επιλογών.*

### Κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων

Στο τελικό στάδιο, οι εναλλακτικές λύσεις κατατάσσονται βάσει των ροών υπεροχής. Η κατάταξη μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω της καθαρής ροής υπεροχής, η οποία προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ της θετικής και της αρνητικής ροής, είτε μέσω της ταυτόχρονης εξέτασης των δύο ροών ξεχωριστά. Η πρώτη προσέγγιση οδηγεί σε πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών (PROMETHEE II), ενώ η δεύτερη επιτρέπει τη διαμόρφωση μερικής κατάταξης και την αναγνώριση πιθανών ασύγκριτων εναλλακτικών (PROMETHEE I), όπως επισημαίνεται και στη σχετική βιβλιογραφία (Behzadian et al., 2010).

Τα βήματα υπολογισμού αυτής της τεχνικής είναι τα ακόλουθα:

**Βήμα 1.** Εξετάζονται όλες τις εναλλακτικές λύσεις ανά ζεύγη και υπολογίζετε η διαφορά των τιμών τους με βάση κάθε κριτήριο ξεχωριστά. Η διαφορά των εναλλακτικών λύσεων ανά ζεύγη ( $A_l, A^h$ ) με βάση το κριτήριο  $X_j$  φαίνεται από το  $d_{l,h,(j)}$

$$d_{l,h,(j)} = a_{l,j} - a_{h,j}$$

όπου  $a_{l,j}$  και  $a_{h,j}$  είναι η τιμή των εναλλακτικών λύσεων  $A_l$  και  $A_h$  στον δείκτη  $X_j$  του αρχικού πίνακα απόφασης, αντίστοιχα.

**Βήμα 2.** Σύμφωνα με τη σχέση προτίμησης που ορίζεται για κάθε κριτήριο, υπολογίζεται η τιμή (βαθμός προτίμησης) των διαφορών που λαμβάνονται στο βήμα 1. Οι διαφορετικοί τύποι σχέσεων προτίμησης δίνονται στον Πίνακα 6.17. Αυτές οι συναρτήσεις είναι καθοριστικές για τον προσδιορισμό του βαθμού στον οποίο μια εναλλακτική λύση προτιμάται έναντι μιας άλλης, με βάση τις διαφορές απόδοσής τους.

Table 6.17 Different types of preference relations.

| Type | Name                                  | Relations                                                                                         | Graph |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1    | Normal (real) index                   | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$                                      |       |
| 2    | U-shaped index                        | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$                                      |       |
| 3    | V-shaped index                        | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{q} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$     |       |
| 4    | Stepped index                         | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$     |       |
| 5    | V-shaped index with indifference zone | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$ |       |
| 6    | Bell-shaped index                     | $P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d}{2\sigma}} & d > 0 \end{cases}$             |       |

Εικόνα 13 Διαφορετικοί τύποι σχέσεων προτίμησης. (Πηγή: Bonakdari , 2024)

**1. Κανονικός (Πραγματικός) Δείκτης:** Αυτός ο τύπος συνάρτησης προτίμησης συνήθως υποδηλώνει μια γραμμική σχέση προτίμησης μεταξύ της διαφοράς απόδοσης δύο εναλλακτικών λύσεων και της έντασης προτίμησης. Με άλλα λόγια, καθώς η διαφορά απόδοσης αυξάνεται, η προτίμηση για την εναλλακτική λύση με την καλύτερη απόδοση αυξάνεται γραμμικά μέχρι να φτάσει σε μια μέγιστη τιμή.

**2. Η συνάρτηση προτίμησης σχήματος U** χαρακτηρίζεται από ένα ξαφνικό άλμα από καμία προτίμηση σε πλήρη προτίμηση σε ένα συγκεκριμένο όριο. Αυτό υποδηλώνει ότι οι μικρές

διαφορές στην απόδοση δεν θεωρούνται αρκετά σημαντικές για να δικαιολογήσουν μια προτίμηση, αλλά μόλις η διαφορά υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή, η προτίμηση γίνεται μέγιστη αμέσως.

**3. Δείκτης σχήματος V:** Αυτή η συνάρτηση υποδηλώνει ότι η ένταση προτίμησης αυξάνεται συνεχώς με τη διαφορά απόδοσης μεταξύ δύο εναλλακτικών λύσεων. Σε αντίθεση με τον δείκτη σχήματος U, δεν υπάρχει ξαφνικό άλμα, αλλά μάλλον μια σταδιακή αύξηση της προτίμησης καθώς το χάσμα απόδοσης διευρύνεται, αντανακλώντας μια πιο αναλογική σχέση.

**4. Βαθμιδωτός Δείκτης:** Η βαθμιδωτή συνάρτηση προτίμησης εισάγει πολλαπλά κατώφλια, δημιουργώντας μια τμηματικά σταθερή συνάρτηση όπου η ένταση προτίμησης αυξάνεται σε "βήματα" καθώς η διαφορά απόδοσης διασχίζει ορισμένα κατώφλια. Αυτό επιτρέπει τη μοντελοποίηση καταστάσεων όπου οι αλλαγές προτίμησης συμβαίνουν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και όχι συνεχώς.

**5. Δείκτης σχήματος V με Ζώνη Αδιαφορίας:** Αυτή η συνάρτηση προτίμησης είναι μια τροποποίηση του δείκτη σχήματος V, που ενσωματώνει μια αρχική ζώνη αδιαφορίας. Εντός αυτής της ζώνης, μικρές διαφορές στην απόδοση δεν επαρκούν για να καθοριστεί μια προτίμηση. Πέρα από αυτήν τη ζώνη, η ένταση προτίμησης αυξάνεται με τρόπο σχήματος V καθώς η διαφορά απόδοσης μεγαλώνει.

**6. Δείκτης σχήματος καμπάνας:** Η συνάρτηση προτίμησης σχήματος καμπάνας εισάγει ένα σενάριο όπου η ένταση προτίμησης αυξάνεται πρώτα με τη διαφορά απόδοσης αλλά στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται αφού φτάσει σε μια κορυφή. Αυτή η συνάρτηση είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου οι ακραίες τιμές (είτε πολύ υψηλές είτε πολύ χαμηλές) δεν είναι επιθυμητές και υπάρχει ένα βέλτιστο εύρος απόδοσης που είναι το πλέον προτιμώμενο.

Κάθε μία από αυτές τις συναρτήσεις προτίμησης επιτρέπει στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων να προσδιορίζει με ακρίβεια την κρίση και τις προτιμήσεις του σχετικά με τις διαφορές στην απόδοση μεταξύ εναλλακτικών λύσεων για κάθε κριτήριο. Επιλέγοντας την κατάλληλη συνάρτηση προτίμησης, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων μπορούν να προσαρμόσουν τη μέθοδο PROMETHEE στο συγκεκριμένο πλαίσιο της απόφασής τους, εξασφαλίζοντας ότι οι κατατάξεις ή οι επιλογές που προκύπτουν ευθυγραμμίζονται στενά με τους στόχους και τις προτιμήσεις τους.

**1. Κανονικός (Πραγματικός) Δείκτης:** Ιδανικός για καταστάσεις όπου ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων αντιλαμβάνεται τις επιπτώσεις των διαφορών απόδοσης μεταξύ εναλλακτικών λύσεων ως άμεσα ανάλογο με το μέγεθος της διαφοράς. Αυτή η συνάρτηση είναι κατάλληλη για κριτήρια όπου οποιαδήποτε βελτίωση αποτιμάται γραμμικά, χωρίς συγκεκριμένα όρια που αλλάζουν τη δυναμική λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, η εξοικονόμηση κόστους ή η αύξηση εσόδων μπορεί να είναι τομείς όπου αυτός ο δείκτης είναι εφαρμόσιμος, καθώς κάθε μονάδα βελτίωσης συμβάλλει άμεσα στην προτίμηση.

**2. Δείκτης σχήματος U:** Εφαρμόζεται καλύτερα σε περιβάλλοντα όπου οι μικρές διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων θεωρούνται αμελητέες και μια ισχυρή προτίμηση καθορίζεται μόνο όταν ξεπεραστεί ένα σημαντικό όριο. Αυτή η συνάρτηση είναι χρήσιμη για κριτήρια με φυσικά ή πρακτικά όρια, όπως ελάχιστα πρότυπα ασφαλείας ή νομικές απαιτήσεις, όπου η συμμόρφωση πάνω από ένα ορισμένο επίπεδο δεν αποφέρει πρόσθετη προτίμηση μέχρι να επιτευχθεί ένα άλλο κρίσιμο όριο.

**3. Δείκτης σχήματος V:** Κατάλληλος για σενάρια όπου ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων θέλει να διατηρήσει μια συνεχή αλλά μη γραμμική αύξηση της προτίμησης με τη διαφορά απόδοσης. Αυτός ο δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου ακόμη και οι μικρές βελτιώσεις αποτιμώνται, αλλά η αξία κάθε πρόσθετης βελτίωσης αυξάνεται καθώς το χάσμα διευρύνεται. Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η ενεργειακή απόδοση, όπου οποιαδήποτε μείωση στην κατανάλωση ενέργειας είναι ωφέλιμη, αλλά οι μεγαλύτερες μειώσεις προτιμώνται όλο και περισσότερο.

**4. Βαθμιδωτός Δείκτης:** Αυτή η συνάρτηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιβάλλοντα αποφάσεων που χαρακτηρίζονται από διακριτές κατηγορίες ή επίπεδα απόδοσης, όπου η μετάβαση σε μια υψηλότερη κατηγορία αλλάζει σημαντικά την προτίμηση. Για παράδειγμα, η ανοδική πορεία σε μια βαθμίδα αυξάνει σημαντικά την επιθυμία για μια εναλλακτική λύση σε μια διαδικασία πιστοποίησης με πολλαπλά επίπεδα (π.χ., χάλκινο, ασημί, χρυσό).

**5. Δείκτης σχήματος V με Ζώνη Αδιαφορίας:** Αυτός ο δείκτης είναι ιδανικός για καταστάσεις όπου υπάρχει ένα εύρος διαφορών απόδοσης που θεωρούνται ασήμαντες από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων, αλλά πέρα από αυτό το εύρος, η προτίμηση αυξάνεται αναλογικά. Αυτή η συνάρτηση θα μπορούσε να εφαρμοστεί στον έλεγχο ποιότητας όπου μικρές αποκλίσεις από έναν στόχο είναι αποδεκτές, αλλά μεγαλύτερες αποκλίσεις, ειδικά πέρα από ένα ορισμένο σημείο, είναι ολοένα και περισσότερο ανεπιθύμητες.

**6. Δείκτης σχήματος καμπάνας:** Ιδανικά κατάλληλος για περιπτώσεις όπου υπάρχει ένα βέλτιστο εύρος απόδοσης, με τις αποκλίσεις και στις δύο πλευρές να είναι λιγότερο προτιμώμενες. Αυτή η συνάρτηση μπορεί να είναι πολύτιμη σε περιβάλλοντα όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες για τη γεωργική παραγωγή, όπου τόσο οι ανεπαρκείς όσο και οι υπερβολικές τιμές (π.χ., επίπεδο pH, υγρασία) είναι ανεπιθύμητες και ένα συγκεκριμένο εύρος θεωρείται ιδανικό.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε κριτήρια με θετική διάσταση (aspect), η τιμή  $d^+$  τοποθετείται στη σχέση προτίμησης, αλλά σε κριτήρια με αρνητική διάσταση (aspect), η τιμή  $d^-$  τοποθετείται στη σχέση προτίμησης.

Το  $e$  είναι ο αριθμός Napier και είναι περίπου ίσο με 2,7183. Η συνάρτηση κουδουνιού ονομάζεται επίσης Γκαουσιανή συνάρτηση προς τιμήν του Carl Friedrich Gauss, ενός διάσημου Γερμανού μαθηματικού (Dunnington et al., 2004).

Προτείνεται η χρήση συναρτήσεων τύπου 1, 2 και 4 για ποιοτικά κριτήρια και σχέσεων 3, 5 και 6 για ποσοτικά κριτήρια (Venkata Rao & Patel, 2010).

Η τιμή προτίμησης της εναλλακτικής  $A_i$  έναντι του  $A_h$  στο κριτήριο  $X_j$  μπορεί να παρουσιαστεί ως  $P_{1,h(j)}$ .

Εάν χρειαστεί, οι ειδικοί καθορίζουν τη σχέση προτίμησης κάθε κριτηρίου και τις παραμέτρους,  $p$ ,  $q$  και  $\sigma$ , σύμφωνα με τη σχέση προτίμησης. Εάν η σχέση προτίμησης τύπου 6 επιλεγεί για ένα κριτήριο, για την εκτίμηση της  $\sigma$  (τυπική απόκλιση), πρώτα οι ειδικοί επιλέγουν τις παραμέτρους  $p$  και  $q$  και στη συνέχεια καθορίζουν την τιμή του  $\sigma$  μεταξύ των δύο κατωφλίων  $p$  και  $q$ .

**Βήμα 3.** Το βάρος κάθε κριτηρίου ( $w_j$ ) πολλαπλασιάζεται στον αντίστοιχο πίνακα ( $P_{1,h(j)}$ ) για να προσδιοριστεί η σταθμισμένη τιμή της προτίμησης του  $A_i$  έναντι του  $A_h$  χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (6.2).

$$\pi_{1h(j)} = P_{1h(j)} \times w_j \quad (6.2)$$

**Βήμα 4.** Υπολογίζεται ο πίνακας αθροίσματος σταθμισμένων τιμών ( $\pi$ ). Οι καταχωρήσεις αυτού του πίνακα λαμβάνονται από το άθροισμα της σταθμισμένης τιμής της προτίμησης κάθε ζεύγους εναλλακτικών επιλογών ( $\pi_{1,h(j)}$ ) σε όλα τα κριτήρια χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (6.3).

$$\pi_{1,h} = \sum_{j=1}^n \pi_{1,h(j)} \quad (6.3)$$

Η ακόλουθη εξίσωση (Εξίσωση 6.4) υπάρχει πάντα μεταξύ τιμών  $\pi_{lh}$

$$\begin{cases} \pi_{l,l} = \pi_{h,h} = 0 \\ 0 \leq \pi_{l,h} \leq 1 \\ 0 \leq \pi_{l,h} + \pi_{h,l} \leq 1 \end{cases} \quad (6.4)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο μέσος όρος της γραμμής με την ένδειξη θετική ροή ( $\phi^+$ ) και ο μέσος όρος της στήλης με την ένδειξη αρνητική ροή ( $\phi^-$ ) για όλες τις εναλλακτικές λύσεις χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (6.5). Επειδή καμία εναλλακτική δεν συγκρίνεται με τον εαυτό της, ο αριθμός των καταχωρίσεων σε κάθε γραμμή και κάθε στήλη είναι  $n-1$

$$\varphi_l^+ = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq h}}^n \pi_{l,h}, \varphi_l^- = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq h}}^n \pi_{h,l}, \quad (6.5)$$

Επίσης, για λόγους απλότητας, ο όρος  $1/n-1$  μπορεί να αφαιρεθεί και οι θετικές και αρνητικές ροές μπορούν να οριστούν ίσες με τα σύνολα γραμμών και στηλών, αντίστοιχα.

**Βήμα 5.** Σύμφωνα με τις θετικές και αρνητικές ροές, υπάρχουν τρεις καταστάσεις που βασίζονται στις Εξισώσεις (6.6) (6.7):

**Πρώτη περίπτωση (υπεροχή):** Εάν πληρούνται μία από τις τρεις παρακάτω συνθήκες, τότε η εναλλακτική λύση  $A_l$  προτιμάται έναντι της εναλλακτικής λύσης  $A_h$  ( $A_l P^1 A_h$ ).

$$\begin{cases} (\varphi_l^-) < (\varphi_h^-) \\ (\varphi_l^+) > (\varphi_h^+) \end{cases}, \begin{cases} (\varphi_l^-) < (\varphi_h^-) \\ (\varphi_l^+) = (\varphi_h^+) \end{cases}, \begin{cases} (\varphi_l^-) = (\varphi_h^-) \\ (\varphi_l^+) > (\varphi_h^+) \end{cases} \quad (6.6)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, η ισχυρή εναλλακτική  $A_l$  είναι έναντι της ασθενούς εναλλακτικής  $A_h$ . Οι θετικές και αρνητικές ροές είναι συμβατές μεταξύ τους και μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες.

**Δεύτερη περίπτωση (αδιαφορία):** εάν πληρούνται οι συνθήκες

$\varphi_l^+ = \varphi_h^+$  και  $\varphi_l^- = \varphi_h^-$  αυτό συμβαίνει όταν οι αρνητικές ροές είναι ίσες μεταξύ τους και οι θετικές ροές είναι ίσες μεταξύ τους, οι εναλλακτικές  $A_l$  και  $A_h$  είναι αδιάφορες ( $A_l I^1 A_h$ ).

**Τρίτη περίπτωση (Ασαφές):** Οι εναλλακτικές  $A_l$  και  $A_h$  δεν μπορούν να συγκριθούν εάν ισχύει μία από τις ακόλουθες δύο συνθήκες ( $A_l P I A_h$ ).

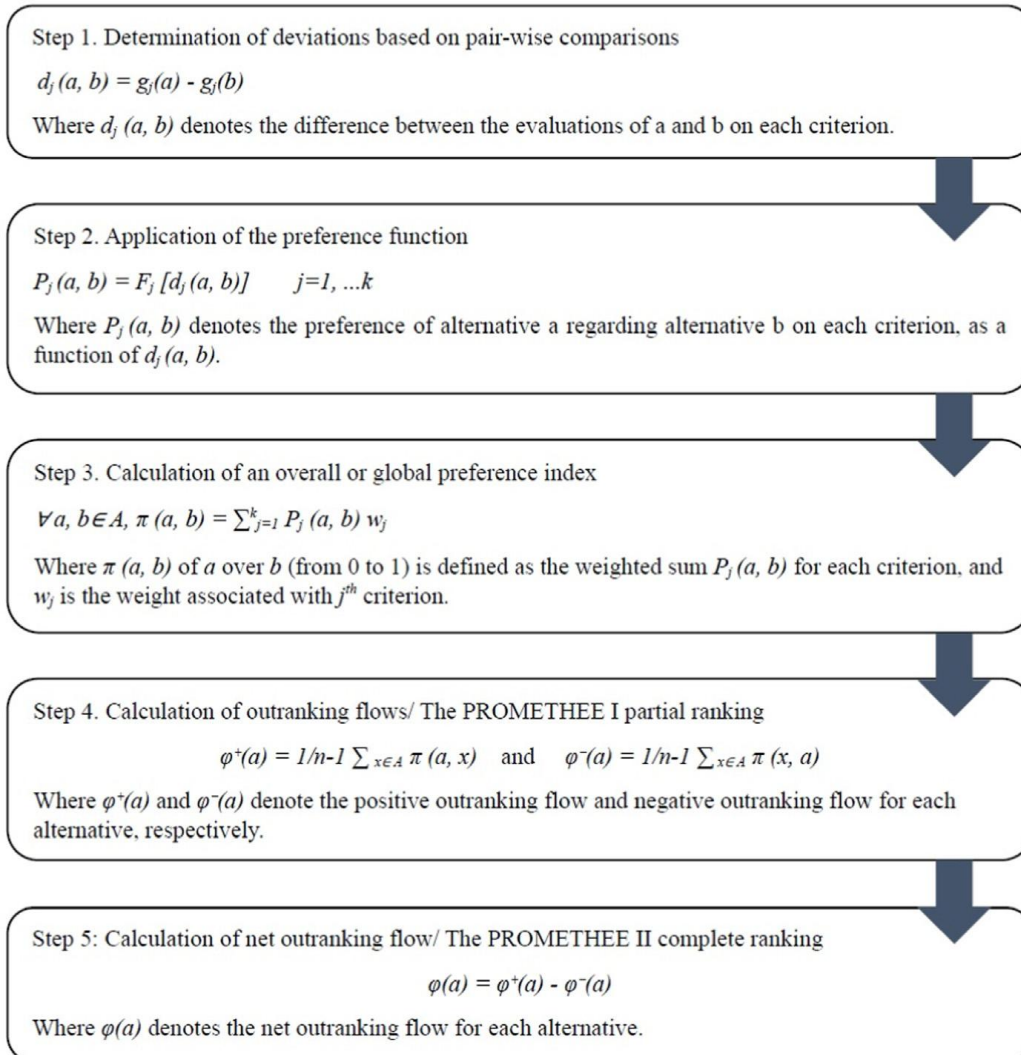
Εδώ, οι σχέσεις  $R I P I P I$  είναι οι ζευγαρωτές σχέσεις των εναλλακτικών.

$$\left\{ \begin{array}{l} (\varphi_l^-) > (\varphi_h^-) \\ (\varphi_l^+) > (\varphi_h^+) \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} (\varphi_l^-) < (\varphi_h^-) \\ (\varphi_l^+) < (\varphi_h^+) \end{array} \right\} \quad (6.7)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, τα δυνατά σημεία κάθε εναλλακτικής λύσης αντιπαραβάλλονται με τα αδύνατα σημεία της άλλης εναλλακτικής. Αυτό συμβαίνει όταν το  $A_l$  είναι καλύτερο από το  $A_h$  σε ορισμένα κριτήρια και το αντίθετο ισχύει σε άλλα κριτήρια.

Ως αποτέλεσμα, οι θετικές και οι αρνητικές ροές δεν είναι συμβατές μεταξύ τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι λογικό να ψηφίσουμε για την ασυμφωνία των εναλλακτικών λύσεων.

Το σχηματικό των βημάτων της μεθόδου PROMETHEE δίνεται στο Σχήμα 6.7.



Εικόνα 14 Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου PROMETHEE. (Πηγή: Bonakdari , 2024)

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Βιβλιογραφική επισκόπηση της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων

### 5.1 Εισαγωγή

Η επιλογή κατάλληλων θέσεων για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πάρκων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων, καθώς η καταλληλότητα μιας περιοχής επηρεάζεται από ένα σύνολο τεχνικών, περιβαλλοντικών, χωρικών, κλιματικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η πολυπαραμετρική φύση του προβλήματος έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και αξιοποίηση διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων, με σημαντική παρουσία των μεθόδων πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Geographic Information Systems – GIS).

Η διεθνής βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων έχει εξελιχθεί από προσεγγίσεις που βασίζονταν σε περιορισμένο αριθμό οικονομικών ή τεχνικών παραμέτρων προς περισσότερο ολοκληρωμένα μοντέλα, στα οποία συνδυάζονται διαφορετικές κατηγορίες κριτηρίων (Spyridonidou & Vagiona, 2023).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αυξανόμενη έμφαση στις μετεωρολογικές και κλιματικές παραμέτρους. Παρότι η σύγχρονη βιβλιογραφία τείνει να ενσωματώνει μεγάλο αριθμό παραμέτρων, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια, η νέφωση, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικές μεταβλητές για την αποτίμηση του ενεργειακού δυναμικού μιας περιοχής. Χαρακτηριστικά, μελέτες που βασίζονται αποκλειστικά ή κυρίως σε μετεωρολογικά δεδομένα χρησιμοποιούν πολυκριτηριακές τεχνικές για την κατάταξη περιοχών με βάση το αναμενόμενο ηλιακό δυναμικό.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα βιβλιογραφική επισκόπηση επικεντρώνεται στις βασικές ερευνητικές τάσεις που έχουν αναπτυχθεί γύρω από τη χωροθέτηση Φ/Β πάρκων, στις μεθοδολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται και, ειδικότερα, στις εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε μελέτες στις οποίες χρησιμοποιούνται μετεωρολογικές παράμετροι, καθώς η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

## 5.2 Ερευνητικές τάσεις και μεθοδολογίες

Η βιβλιογραφία σχετικά με τη χωροθέτηση Φ/Β εγκαταστάσεων παρουσιάζει σημαντική μεθοδολογική ποικιλία. Οι συνηθέστερες προσεγγίσεις βασίζονται στον συνδυασμό GIS και μεθόδων πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων. Τα GIS επιτρέπουν την επεξεργασία και χωρική αναπαράσταση των δεδομένων, ενώ οι μέθοδοι MCDM χρησιμοποιούνται για τη στάθμιση και τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων.

Η συστηματική ανασκόπηση των Spyridonidou και Vagiona (2023) αποτελεί χαρακτηριστική αποτύπωση της συγκεκριμένης τάσης. Από τις 10.121 επιστημονικές εργασίες που εξετάστηκαν αρχικά, 152 κρίθηκαν κατάλληλες για λεπτομερή ανάλυση. Η ανασκόπηση καταγράφει μεγάλο εύρος μεθόδων, μεταξύ των οποίων οι AHP, TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE, VIKOR, WASPAS, MAUT, ANP και άλλες, ενώ παράλληλα εξετάζει τη χρήση τους σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας χωροθέτησης.

Μία δεύτερη σημαντική τάση είναι η μετάβαση από απλά μοντέλα αξιολόγησης προς υβριδικά μοντέλα, στα οποία συνδυάζονται περισσότερες από μία μέθοδοι. Η AHP χρησιμοποιείται συχνά για τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων, ενώ άλλες μέθοδοι, όπως οι TOPSIS, PROMETHEE και MULTIMOORA, χρησιμοποιούνται για την τελική κατάταξη των εναλλακτικών. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί ασαφείς παραλλαγές των κλασικών μεθόδων, με στόχο την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τις κρίσεις των εμπειρογνομόνων.

Η πρόσφατη συστηματική ανασκόπηση των Liang et al. (2025) επιβεβαιώνει την εξέλιξη αυτή. Η μελέτη διαπιστώνει μετατόπιση από τις αρχικές προσεγγίσεις που επικεντρώνονταν κυρίως σε οικονομικούς παράγοντες προς πολυδιάστατα μοντέλα που ενσωματώνουν περιβαλλοντικές, τεχνικές και κοινωνικές διαστάσεις. Παράλληλα, αναδεικνύεται η αυξανόμενη χρήση υβριδικών μεθόδων, τεχνικών βελτιστοποίησης και μηχανικής μάθησης. Η ίδια μελέτη επισημαίνει, ωστόσο, την απουσία τυποποιημένων διαδικασιών και συγκριτικής επικύρωσης μεταξύ διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων.

Σε επίπεδο κριτηρίων, παρατηρείται επίσης μια βασική διάκριση μεταξύ περιοριστικών κριτηρίων και κριτηρίων αξιολόγησης. Τα πρώτα χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση περιοχών στις οποίες η εγκατάσταση δεν θεωρείται κατάλληλη, ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούνται για την ιεράρχηση των εναλλακτικών περιοχών που απομένουν. Η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς διαχωρίζει τον αποκλεισμό μιας θέσης από τη σχετική προτίμηση μεταξύ θέσεων που θεωρούνται δυνητικά κατάλληλες. Η λογική αυτή καταγράφεται και στη σύγχρονη βιβλιογραφική ανασκόπηση των Liang et al. (2025).

Παράλληλα, σημαντικό τμήμα της βιβλιογραφίας εξακολουθεί να επικεντρώνεται στη χρήση μετεωρολογικών και κλιματικών παραμέτρων. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί συνήθως μία από τις σημαντικότερες μεταβλητές, ενώ σε αρκετές μελέτες συνεκτιμώνται η θερμοκρασία, η υγρασία, η νέφωση, η ηλιοφάνεια και η ταχύτητα του ανέμου. Ενδεικτικά, οι Elboshy et al. (2022) ενσωματώνουν μετεωρολογικά και κλιματολογικά κριτήρια σε ένα μοντέλο GIS-AHP για την αξιολόγηση θέσεων στην Αίγυπτο, ενώ οι Yilmaz et al. (2024) χρησιμοποιούν 11 κριτήρια, μεταξύ των οποίων κλιματικές, οικονομικές, τοπογραφικές και περιβαλλοντικές μεταβλητές, σε συνδυασμό FAHP και GIS.

Τέλος, η πρόσφατη βιβλιογραφία δείχνει ότι η έρευνα δεν περιορίζεται πλέον στην κλασική εφαρμογή των MCDM μεθόδων. Εξετάζονται ασαφείς προσεγγίσεις, αντικειμενικές μέθοδοι προσδιορισμού βαρών, τεχνικές μηχανικής μάθησης, ακόμη και η χρήση Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων ως υποστηρικτικών εργαλείων στη διαδικασία στάθμισης. Οι Memduhoğlu et al. (2025), για παράδειγμα, εξέτασαν την ικανότητα LLMs να προσεγγίσουν τη στάθμιση κριτηρίων από ανθρώπινους εμπειρογνώμονες στο πλαίσιο AHP, καταδεικνύοντας μία από τις νεότερες κατευθύνσεις της σχετικής έρευνας.

### 5.3 Κριτήρια χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση προκύπτει ότι, παρά την ποικιλία των μεθοδολογικών προσεγγίσεων που εφαρμόζονται διεθνώς, παρατηρείται σημαντική σύγκλιση ως προς τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της καταλληλότητας θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάρκων. Η συστηματική ανασκόπηση των Spyridonidou και Vagiona (2023), η οποία περιλαμβάνει την ανάλυση 152 επιστημονικών δημοσιεύσεων, καταδεικνύει ότι τα κριτήρια χωροθέτησης οργανώνονται σε διακριτές θεματικές κατηγορίες που αφορούν κυρίως τις μετεωρολογικές, τοπογραφικές, περιβαλλοντικές, τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές παραμέτρους. Αντίστοιχα, η βιβλιογραφική ανασκόπηση των Liang et al. (2025) επισημαίνει ότι η σύγχρονη έρευνα προσεγγίζει πλέον τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών ως ένα πολυδιάστατο πρόβλημα λήψης αποφάσεων, στο οποίο συνδυάζονται ενεργειακά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά δεδομένα.

Η σημαντικότερη κατηγορία αφορά τα μετεωρολογικά και κλιματικά κριτήρια, καθώς αυτά επηρεάζουν άμεσα την ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί διαχρονικά το κυρίαρχο κριτήριο αξιολόγησης, καθώς καθορίζει το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό μιας περιοχής και συνεπώς το αναμενόμενο επίπεδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη θερμοκρασία του

αέρα, η οποία επηρεάζει την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ συχνά εξετάζονται επίσης η νέφωση, οι ώρες ηλιοφάνειας, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Οι Karadöl και Yildirim (2025) βασίζουν την αξιολόγηση πιθανών θέσεων αποκλειστικά σε πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα, ενώ οι Krishankumar et al. (2025) αναδεικνύουν ως σημαντικότερα χαρακτηριστικά την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία, τις ώρες ηλιοφάνειας και τη θερμοκρασία. Αντίστοιχα, οι Yilmaz et al. (2024) και Elboshy et al. (2022) επισημαίνουν τη σημασία της νέφωσης και της ηλιοφάνειας, ενώ οι Hassan et al. (2023) ενσωματώνουν επιπλέον τη σχετική υγρασία και την ταχύτητα του ανέμου στο σύστημα αξιολόγησης.

Εξίσου σημαντική είναι η ομάδα των τοπογραφικών και γεωμορφολογικών κριτηρίων, τα οποία επηρεάζουν τόσο την τεχνική δυνατότητα εγκατάστασης όσο και το κόστος κατασκευής ενός έργου. Η κλίση του εδάφους, ο προσανατολισμός των πρανών, το υψόμετρο και γενικότερα η γεωμορφολογία της περιοχής αποτελούν από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες παραμέτρους στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς σχετίζονται με τη βέλτιστη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και με τις απαιτήσεις διαμόρφωσης του χώρου. Τα συγκεκριμένα κριτήρια χρησιμοποιούνται συστηματικά στις μελέτες των Çolak et al. (2020), Farnaz et al. (2025), Malinić et al. (2025), Al-Awadhi et al. (2025) και Qi et al. (2026).

Σημαντική θέση κατέχουν επίσης τα τεχνικά κριτήρια και τα κριτήρια υποδομών, τα οποία σχετίζονται κυρίως με τη δυνατότητα σύνδεσης του έργου στο ηλεκτρικό σύστημα και με τη μείωση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται η απόσταση από το οδικό δίκτυο, οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι υποσταθμοί, οι μετασχηματιστές και γενικότερα οι υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές. Οι Çolak et al. (2020) και Qi et al. (2026) ενσωματώνουν τα παραπάνω στοιχεία ως βασικές παραμέτρους αξιολόγησης, ενώ οι Zambrano et al. (2021) συνδυάζουν την καταλληλότητα της θέσης με τη χωρική κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου, προκειμένου να εξυπηρετείται αποτελεσματικότερα η μελλοντική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα, οι Guehrar et al. (2026) αποδεικνύουν ότι η τεχνική καταλληλότητα ενός σημείου σύνδεσης δεν αρκεί από μόνη της για την επιλογή μιας θέσης, καθώς απαιτείται ταυτόχρονα η εξέταση χωρικών και περιβαλλοντικών περιορισμών.

Μία ακόμη βασική κατηγορία αποτελείται από τα περιβαλλοντικά και χωροταξικά κριτήρια, τα οποία αποσκοπούν στη διασφάλιση της συμβατότητας των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Στην ομάδα αυτή περιλαμβάνονται οι χρήσεις γης, οι προστατευόμενες περιοχές, οι δασικές εκτάσεις, η απόσταση από ποτάμια, λίμνες και άλλους υδάτινους αποδέκτες, καθώς και η εγγύτητα σε

οικισμούς ή άλλες περιοχές ιδιαίτερης περιβαλλοντικής ή πολιτιστικής αξίας. Οι Malinić et al. (2025), Farnaz et al. (2025) και Mbufua et al. (2025) επισημαίνουν ότι η ενσωμάτωση των παραμέτρων αυτών οδηγεί σε περισσότερο ρεαλιστικά και περιβαλλοντικά αποδεκτά αποτελέσματα χωροθέτησης, ενώ οι Gao et al. (2026) αναδεικνύουν τη σημασία τους στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων ενεργειακών συστημάτων.

Τα οικονομικά κριτήρια αποτελούν διαχρονικά βασικό άξονα της αξιολόγησης της καταλληλότητας θέσεων, καθώς η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών πάρκων συνιστά επένδυση μεγάλης κλίμακας, της οποίας η βιωσιμότητα εξαρτάται από την αναμενόμενη οικονομική απόδοση. Για τον λόγο αυτό, πολλές μελέτες δεν περιορίζονται στην αξιολόγηση του ενεργειακού δυναμικού μιας περιοχής, αλλά συνεκτιμούν δείκτες που σχετίζονται με το κόστος κατασκευής και λειτουργίας καθώς και με τη χρηματοοικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης. Στη βιβλιογραφία συναντώνται συχνά κριτήρια όπως το αρχικό κόστος εγκατάστασης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, η καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value – NPV), ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR), η περίοδος αποπληρωμής (Payback Period), το σταθμισμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCOE) και τα αναμενόμενα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη των Raptis και Aretoulis (2024), στην οποία η αξιολόγηση διαφορετικών επενδυτικών σεναρίων πραγματοποιείται με βάση ενεργειακούς και χρηματοοικονομικούς δείκτες. Αντίστοιχα, οι Hassan et al. (2023) ενσωματώνουν οικονομικά κριτήρια όπως το LCOE, την παρούσα αξία, την περίοδο αποπληρωμής και τα συνολικά έσοδα της επένδυσης, ενώ οι Qi et al. (2026) συνδυάζουν την ενεργειακή απόδοση με οικονομικούς δείκτες βιωσιμότητας κατά την αξιολόγηση εναλλακτικών διατάξεων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Τα κοινωνικά κριτήρια, αν και εμφανίζονται με μικρότερη συχνότητα σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες, αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Στην ομάδα αυτή περιλαμβάνονται παράμετροι όπως η πυκνότητα πληθυσμού, η απόσταση από κατοικημένες περιοχές, η κοινωνική αποδοχή των έργων, οι πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής των τοπικών κοινωνιών και η συμβολή των εγκαταστάσεων στην περιφερειακή ανάπτυξη. Η ενσωμάτωση τέτοιων κριτηρίων αντανakλά τη σταδιακή μετάβαση από αμιγώς τεχνικοοικονομικές προσεγγίσεις σε περισσότερο ολοκληρωμένα μοντέλα λήψης αποφάσεων που λαμβάνουν υπόψη τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι Liang et al. (2025) επισημαίνουν ότι η ενσωμάτωση κοινωνικών παραμέτρων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις της πρόσφατης βιβλιογραφίας, ενώ οι Hassan et al. (2023) χρησιμοποιούν την πυκνότητα πληθυσμού ως κριτήριο αξιολόγησης. Παράλληλα, οι Malinić

et al. (2025) και Gao et al. (2026) υπογραμμίζουν ότι η συνεκτίμηση κοινωνικών και περιφερειακών παραμέτρων οδηγεί σε περισσότερο ισορροπημένες και βιώσιμες αποφάσεις χωροθέτησης.

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η αξιολόγηση της καταλληλότητας μιας θέσης για εγκατάσταση φωτοβολταϊκού πάρκου αποτελεί αποτέλεσμα της συνδυασμένης εξέτασης πολλών διαφορετικών κατηγοριών κριτηρίων, των οποίων η επιλογή διαφοροποιείται ανάλογα με τους στόχους της εκάστοτε μελέτης, τα διαθέσιμα δεδομένα και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής εφαρμογής. Στην παρούσα εργασία, σύμφωνα με τον ερευνητικό της σκοπό, η αξιολόγηση περιορίζεται αποκλειστικά στα μετεωρολογικά κριτήρια, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ενεργειακής καταλληλότητας των εξεταζόμενων θέσεων μέσω της μεθόδου PROMETHEE, χωρίς να ενσωματώνονται χωροταξικοί, περιβαλλοντικοί, τεχνικοί, οικονομικοί ή κοινωνικοί περιορισμοί.

#### 5.4 Επισκόπηση επιλεγμένων ερευνητικών εφαρμογών

Στο άρθρο των Spyridonidou & Vagiona (2023), πραγματοποιείται συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας διερευνώντας τις διαδικασίες χωροθέτησης φωτοβολταϊκών (PV) και συγκεντρωτικών ηλιακών σταθμών (CSP). Η μελέτη καταγράφει, συγκρίνει και αξιολογεί τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν σε 152 επιλεγμένες επιστημονικές μελέτες. Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι χωροθέτησης περιλαμβάνουν GIS σε συνδυασμό με πολυκριτηριακές τεχνικές, όπως AHP, TOPSIS, PROMETHEE, ενώ τα περιβαλλοντικά κριτήρια και ιδιαίτερα η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η κλίση του εδάφους, αναδεικνύονται ως καθοριστικά για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των περιοχών.

Η μελέτη των Liang et al. (2025) εξέτασε διεξοδικά την παγκόσμια έρευνα σχετικά με την επιλογή τοποθεσίας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών χρησιμοποιώντας μια καινοτόμο μεθοδολογία βιβλιογραφικής ανασκόπησης που υποστηρίζεται από την Τεχνητή Νοημοσύνη συνδυάζοντας το ChatGPT με το Consensus για τη συλλογή και προεπιλογή της βιβλιογραφίας και το DeepSeek για τη βαθύτερη ανάλυση και εξαγωγή γνώσης από αυτήν. Παράλληλα εφαρμόζεται η παραδοσιακή βιβλιομετρική ανάλυση και επαγωγική σύνοψη δεδομένων. Ο συνδυασμός αυτών των εργαλείων βελτίωσε την αποτελεσματικότητα, το εύρος και τη δομή της ανάκτησης και ανάλυσης της βιβλιογραφίας. Από τη διαδικασία αυτή διαπιστώνεται ότι ο τομέας έχει μετατοπιστεί από απλές οικονομικές αξιολογήσεις σε πολυκριτηριακές και πολυδιάστατες αναλύσεις που ενσωματώνουν περιβαλλοντικούς,

τεχνικούς και κοινωνικούς παράγοντες ενώ παράλληλα, οι σύγχρονες τεχνικές όπως οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης έχουν βελτιώσει την ακρίβεια και αποδοτικότητα των αποφάσεων. Ωστόσο, επισημαίνεται ο μεθοδολογικός κατακερματισμός καθώς και ότι πολλές μελέτες δεν παρουσιάζουν συγκριτική επικύρωση μεταξύ των τεχνικών. Αναφορικά με το σύστημα δεικτών αξιολόγησης διαπιστώνεται μια λογική διπλού επιπέδου. Αφενός χρησιμοποιούνται περιοριστικά κριτήρια για την εξάλειψη ακατάλληλων τοποθεσιών, αφετέρου τα κριτήρια καταλληλότητας επιτρέπουν τη σύγκριση πολλαπλών παραγόντων μεταξύ των υπόλοιπων επιλογών.

Στο άρθρο των Raptis & Aretoulis (2024) μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν επενδύσεις σε έργα παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά εφαρμόζοντας μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης. Ειδικότερα αξιολογήθηκαν δύο ομάδες έργων διαφοροποιούμενες μεταξύ τους ως προς την ονομαστική ισχύ, τα πάνελ και τους inverters. Εξ'αυτών, η μία ομάδα είχε ονομαστική ισχύ 50 MW ενώ η άλλη 500 MW. Σχετικά με τα εξεταζόμενα πάνελ, αυτά διαφοροποιούνταν μεταξύ μονοκρυσταλλικών πυριτίου, πολυκρυσταλλικών πυριτίου και διφασικών. Αναφορικά με τους inverters μελετήθηκε η τοπολογία του κεντρικού μετατροπέα και η τοπολογία του μετατροπέα σειράς. Οι παράμετροι εισαγωγής στο λογισμικό υπολογισμού ήταν η γεωγραφική θέση, η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς, οι ενεργειακές απώλειες, το κόστος επένδυσης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης με βάση τις τρέχουσες τιμές αγοράς ανά περίπτωση, η μέση τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η διάρκεια ζωής του έργου, ο ετήσιος ρυθμός πληθωρισμού, το επιτόκιο δανεισμού, οι όροι δανεισμού, το επιτόκιο δανεισμού και οι αποσβέσεις του εξοπλισμού. Τα αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των επενδύσεων ήταν ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, το σταθμισμένο κόστος φόρτισης, η καθαρή παρούσα αξία, η περίοδος αποπληρωμής και ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης. Τελικώς, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης χρησιμοποιώντας τις μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης PROMETHEE, AHP και TOPSIS, έδειξαν ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ενέργειας που θα πρέπει να προτιμώνται είναι αυτά με αυξημένη ονομαστική ισχύ, όπου χρησιμοποιούνται πάνελ τεχνολογίας μονοκρυσταλλικού πυριτίου ακολουθώντας την τοπολογία του κεντρικού μετατροπέα.

Στο άρθρο των Zambrano et al. (2021) πραγματοποιείται έρευνα στον Ισημερινό με αντικείμενο τη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων, συνδεδεμένων στο δίκτυο μέσης τάσης, χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακή ανάλυση βασισμένη σε Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS-MCDM) και χωρική επικάλυψη με ηλεκτρικό

φορτίο. Η προτεινόμενη προσέγγιση ενσωματώνει μια ανάλυση καταλληλότητας με την πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου για την εύρεση βέλτιστων τοποθεσιών για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα και μελλοντική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το τελικό αποτέλεσμα της μελέτης μεταφράζεται σε μια βαθμολογία καταλληλότητας που αντικατοπτρίζεται σε έναν χάρτη θερμότητας στον οποίο εμφανίζεται η ρεαλιστική ανάγκη για ηλεκτρικό φορτίο. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε ένα περιβάλλον GIS-MCDM είναι διαθέσιμες ή μπορούν να αναπτυχθούν στα υφιστάμενα υπολογιστικά εργαλεία κατά τρόπο ώστε να ενσωματώνουν περιβαλλοντικά, γεωγραφικά, κλιματικά και ορογραφικά κριτήρια. Με τη χρήση αισθητήρων, μετρήσεων από επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας καθώς και μελετών του ηλεκτρικού δικτύου σε περιβάλλον GIS, είναι δυνατό να επιτευχθεί χωρική κατανομή φορτίου για την αξιολόγηση μελλοντικών σεναρίων ανάπτυξης.

Η μελέτη του Gökler (2025) διεξήχθη στην περιοχή Εσχισερ της Τουρκίας και έχει ως αντικείμενο τη βελτίωση της διαδικασίας χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω προηγμένων πολυκριτηριακών και γεωχωρικών μεθόδων. Στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση μιας αξιόπιστης μεθοδολογίας επιλογής τοποθεσίας που να μπορεί να διαχειριστεί τόσο την πολυπλοκότητα των περιβαλλοντικών παραμέτρων όσο και την αβεβαιότητα που ενυπάρχει στις κρίσεις των εμπειρογνομόνων. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται βασίζεται στον συνδυασμό Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) με τη Μέθοδο Αναλυτικής Ιεράρχησης σε Πυθαγόρεια ασαφή μορφή (Pythagorean Fuzzy AHP), επιτρέποντας την ακριβέστερη αποτύπωση της σχετικής βαρύτητας των κριτηρίων σε περιπτώσεις όπου οι αξιολογήσεις δεν είναι απολύτως σαφείς. Επιπλέον, διεξήχθη μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ της PF-AHP και της Διαισθητικής Ασαφούς AHP (IF-AHP), εστιάζοντας στα βάρη κριτηρίων και στους χάρτες καταλληλότητας που βασίζονται σε GIS. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η IF-AHP παράγει σχεδόν ομοιόμορφες κατανομές βαρών, καθιστώντας την λιγότερο αποτελεσματική στην ιεράρχηση βασικών παραγόντων όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η πρόσβαση σε συγκοινωνιακό δίκτυο. Αντίθετα, η PF-AHP προσφέρει μια πιο διαφοροποιημένη προσέγγιση που ευθυγραμμίζεται με την κρίση των ειδικών και τη βιβλιογραφία.

Η μελέτη των Krishankumar et al. (2025) επικεντρώνεται στη συστηματική κατάταξη υποψήφιων περιοχών για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων στην Ινδία χρησιμοποιώντας ένα διστακτικό ασαφές πλαίσιο διπλής ιεραρχίας (double-hierarchy hesitant fuzzy context). Κατά τη διαδικασία αυτή i) τα βάρη των ειδικών προκύπτουν μέσα από μια συγκεκριμένη διαβάθμιση (από θλίψη προς χαρά) ii) τα βάρη των χαρακτηριστικών

προσδιορίζονται μέσω μιας στρατηγικής αθροίσματος κατάταξης βασισμένης σε τεκμήρια iii) διαμορφώνεται ένας αλγόριθμος για την κατάταξη των ηλιακών πάρκων με μια συνδυαστική αξιολόγηση βασισμένη στην απόσταση (CODAS) και το σχήμα Copeland και iv) μια επιλεγμένη τοποθεσία από την Ινδία λαμβάνεται ως παράδειγμα της χρησιμότητας της προσέγγισης. Από τους μελετητές επισημαίνεται ότι η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία, οι ώρες ηλιοφάνειας, η θερμοκρασία, η φιλικότητα προς το περιβάλλον και η κάλυψη γης είναι τα πέντε κορυφαία χαρακτηριστικά που προωθούν/υποστηρίζουν ενεργά την ορθολογική επιλογή κατάλληλων τοποθεσιών για την εγκατάσταση ενός ηλιακού πάρκου.

Η μελέτη των Malinić et al. (2025), έχει ως αντικείμενο τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε αγροτικές περιοχές στη Σερβία. Στόχος της μελέτης είναι η αξιοποίηση υποβαθμισμένων ή ανενεργών εκτάσεων για την ανάπτυξη ηλιακής ενέργειας, μέσω μιας δομημένης και αξιόπιστης πολυκριτηριακής διαδικασίας αξιολόγησης καταλληλότητας. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται βασίζεται σε έναν υβριδικό συνδυασμό της ασαφούς Αναλυτικής Ιεράρχησης (fuzzy AHP) για τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων και της μεθόδου MULTIMOORA για την κατάταξη των εναλλακτικών τοποθεσιών, επιτρέποντας τη διαχείριση της αβεβαιότητας στις κρίσεις των ειδικών και τη σύγκριση πολλαπλών σεναρίων απόφασης. Στο πλαίσιο της ανάλυσης λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός, η κλίση του εδάφους, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η απόσταση από οικισμούς, οι χρήσεις γης, η απόσταση από ποτάμια και από προστατευόμενες περιοχές. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η τελική κατάταξη, που προέκυψε χρησιμοποιώντας τη ασαφή μέθοδο MULTIMOORA, επέτρεψε την ταξινόμηση των τοποθεσιών τόσο με βάση τη τεχνική σκοπιμότητα όσο και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο μια πιο ισορροπημένη και ολιστική προσέγγιση στην επιλογή τοποθεσίας. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη χωρική εφαρμοσιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου και τις δυνατότητές του για αναπαραγωγή σε άλλες περιοχές. Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση είναι χρήσιμη για τη διαμόρφωση πολιτικών περιφερειακής ανάπτυξης και ενεργειακής μετάβασης ανοίγοντας το δρόμο για μελλοντική έρευνα, ιδίως στην ενσωμάτωση οικονομικών δεικτών.

Η μελέτη των Karadöl & Yildirim (2025), διερευνά τη βέλτιστη τοποθεσία για εγκατάσταση ηλιακών φωτοβολταϊκών σταθμών παραγωγής ενέργειας αξιοποιώντας πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα. Ειδικότερα, αξιολογούνται δεδομένα από τρεις διαφορετικές επαρχίες της Τουρκίας για το έτος 2021, χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP) προκειμένου να εντοπιστεί η περιοχή εκείνη που παρουσιάζει το υψηλότερο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία. Η μεθοδολογία που

εφαρμόζεται προσδιορίζει ως εξεταζόμενα κριτήρια την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία, την υγρασία, τη νέφωση και την ταχύτητα του ανέμου. Στα κριτήρια αυτά αποδόθηκαν βαρύτητες οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τη βιβλιογραφία και τη γνώμη ειδικών.

Η μελέτη των Çolak et al. (2020) εστιάζει στη βέλτιστη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών στην επαρχία Malatya της Τουρκίας. Στόχος της μελέτης είναι ο προσδιορισμός των πλέον κατάλληλων περιοχών για εγκατάσταση Φ/Β πάρκων μέσω της συνδυαστικής αξιοποίησης GIS και της μεθόδου AHP (Analytic Hierarchy Process). Τα κριτήρια αξιολόγησης περιλαμβάνουν το ηλιακό δυναμικό, την κλίση εδάφους, την απόσταση από οδικό δίκτυο, την απόσταση από κατοικημένες περιοχές, την απόσταση από δίκτυα μεταφοράς ενέργειας, την απόσταση από ρήγματα, την απόσταση από λίμνες και φράγματα, την απόσταση από κεντρικούς μετασχηματιστές, η απόσταση από γραμμές φυσικού αερίου και το είδος φυτικής κάλυψης της γης. Τέλος, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με υφιστάμενους ηλιακούς φωτοβολταϊκούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και προτάθηκε μια εμπειρική προσέγγιση που προσδιορίζει τη βέλτιστη λύση χωροθέτησης για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

Η μελέτη των Farnaz et al. (2025) εστιάζει στην αξιολόγηση και επιλογή βέλτιστων θέσεων για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων σε τρεις διοικητικές περιφέρειες του Πακιστάν με παράλληλη εκτίμηση της πιθανής μείωσης εκπομπών CO<sub>2</sub> που θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ανανεώσιμης ενέργειας. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται είναι η λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων MCDM και οι παράμετροι που αναλύθηκαν είναι η ηλιακή ακτινοβολία, οι σκιάσεις λόφων, η θερμοκρασία της επιφάνειας της γης, η κλίση, ο προσανατολισμός, η ορατότητα, η γεωμορφολογία, η χρήση γης. Για την απόδοση της βαρύτητας στις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους αξιοποιήθηκε η βιβλιογραφία και η γνώμη ειδικών.

Η μελέτη των Al-Awadhi et al. (2025) διερευνά τη βέλτιστη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάρκων στην περιοχή Al Duqm του Ομάν, μια αναπτυσσόμενη ενεργειακά και βιομηχανικά ζώνη με υψηλό ηλιακό δυναμικό.

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται βασίζεται σε πολυκριτηριακή ανάλυση με τη χρήση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP) σε συνδυασμό με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), όπου τα κριτήρια σταθμίζονται μέσω ζευγαρωτών συγκρίσεων σε ζεύγη και ενσωματώνονται σε χωρικό μοντέλο καταλληλότητας. Η AHP εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας δώδεκα κριτήρια, κατηγοριοποιημένα σε τρεις ενότητες (τοπογραφία, κλιματικά δεδομένα και οικονομικά). Αυτά τα κριτήρια περιλαμβάνουν παράγοντες όπως η

κλίση, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, οι δρόμοι και άλλοι. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε κατηγορίες για την ταξινόμηση των αποτελεσμάτων: πολύ χαμηλή καταλληλότητα, χαμηλή καταλληλότητα, μέτρια καταλληλότητα, υψηλή καταλληλότητα και πολύ υψηλή καταλληλότητα. Από τα συμπεράσματα της μελέτης προκύπτει ότι οι μεθοδολογίες GIS και AHP μπορούν να αξιολογήσουν αποτελεσματικά τους παράγοντες που μελετήθηκαν και να διασφαλίσουν ότι τα έργα ηλιακής ενέργειας συμβάλλουν στην οικονομική ανάπτυξη και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Η μελέτη των Memduhoğlu et al. (2025), εξετάζει το ρόλο των Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (Large Language Models – LLMs) ως εναλλακτικών ή συμπληρωματικών «εικονικών ειδικών» στη διαδικασία στάθμισης κριτηρίων για τη χωροθέτηση ηλιακών σταθμών παραγωγής ενέργειας. Αντικείμενο της έρευνάς τους αποτελεί η αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της συνέπειας των βαρών κριτηρίων που παράγονται από LLMs, συγκριτικά με εκείνα που προκύπτουν από ανθρώπινους ειδικούς, στο πλαίσιο της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP). Ειδικότερα συγκρίθηκαν 6 σύγχρονα LLM με μια ομάδα 10 εμπειρογνομόνων για τον προσδιορισμό βαρών κριτηρίων. Η εφαρμοζόμενη μεθοδολογία δοκιμάζει πολλαπλές στρατηγικές προτροπής, αξιολογεί την απόδοση, εξετάζει τη σταθερότητα σε όλες τις επαναλήψεις και εντοπίζει μεροληψίες. Χρησιμοποιήθηκαν 14 χωρικά σαφή κριτήρια, που καλύπτουν το δυναμικό των πόρων, την τοπογραφία, τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς και τη συνδεσιμότητα των υποδομών. Από τα αποτελέσματα της έρευνας προκύπτει ότι τα LLM διαθέτουν την ικανότητα να προσεγγίζουν ουσιαστικά την κρίση των ειδικών σε δομημένα χωρικά πλαίσια λήψης αποφάσεων, κατατάσσοντας τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης ως βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις στην παραδοσιακή εμπειρογνωμοσύνη όταν διαμορφώνονται κατάλληλα. Ταυτόχρονα όμως αποδεικνύεται ότι οι μέθοδοι MCDM όπως η AHP δεν υπολείπονται σε αξιοπιστία σε σχέση με τις ανώτερες ικανότητες επεξεργασίας της τεχνικής νοημοσύνης. Τελικώς υποστηρίζεται ότι οι τρέχουσες δυνατότητες υποστηρίζουν τον προκαταρκτικό έλεγχο και τη σύνθεση από ειδικούς υπό ανθρώπινη επίβλεψη, όχι την αυτόνομη λήψη αποφάσεων σε περιβάλλοντα υποδομών υψηλού διακυβεύματος.

Η μελέτη των Guehrar et al. (2026) εξετάζει την βέλτιστη ενσωμάτωση της παραγωγής ενέργειας που προέρχεται από φωτοβολταϊκά σε δίκτυα μέσης τάσης γύρω από την πόλη Ouargla της Αλγερίας. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται εντοπίζει κατ' αρχάς κατάλληλους κόμβους σύνδεσης εξετάζοντας τους ηλεκτρολογικούς δείκτες του συντελεστή ευαισθησίας απωλειών και του δείκτη σταθερότητας τάσης. Παρόλο που αυτοί οι κόμβοι επέδειξαν υψηλή

ηλεκτρική απόδοση, η επακόλουθη γεωχωρική ανάλυση αποκάλυψε σημαντικούς περιορισμούς χρήσης γης, καθιστώντας τους ακατάλληλους για ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο. Για να ξεπεραστεί αυτό, εφαρμόστηκε μια διαδικασία λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων βασισμένη σε γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών που χρησιμοποιεί τη μέθοδο καλύτερου-χειρότερου, ενσωματώνοντας τον συντελεστή ευαισθησίας απωλειών και τον δείκτη σταθερότητας τάσης μαζί με οικονομικά, περιβαλλοντικά και ορογραφικά κριτήρια. Αξιολογήθηκαν 3 σενάρια από τα οποία τελικώς προέκυψε ότι μόνο 0,07–1,64% της γης ταξινομείται ως εξαιρετικά κατάλληλη. Στα συμπεράσματα της μελέτης καταγράφεται ότι η προσέγγιση που προτάθηκε είναι εφαρμόσιμη και σε άλλες περιοχές περιορισμούς του δικτύου ή των υποδομών, παρέχοντας στους υπευθύνους χάραξης πολιτικής ένα σημαντικό εργαλείο που εξισορροπεί τεχνικές, χωρικές και οικονομικές παραμέτρους.

Αντικείμενο της μελέτης των Hooshangi et al. (2023) αποτελεί η αξιολόγηση για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάρκων στο Ιράν εφαρμόζοντας την τεχνική της σειράς προτίμησης με βάση την ομοιότητα προς την ιδανική λύση Fermatean Fuzzy (FF) TOPSIS που βασίζεται σε γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS). Τα κριτήρια που αξιολογούνται είναι οικονομικά, γεωγραφικά, υποδομών και δημογραφικά. Οι βαρύτητες που τους αποδίδονται προέκυψαν με βάση την επισκόπηση της βιβλιογραφίας και ερωτηματολόγια σε ειδικούς. Επιπλέον τα αποτελέσματα της αρχικής επίλυσης συγκρίθηκαν με εκείνα του TFN-TOPSIS και του TOPSIS. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι παρά την υψηλή συσχέτιση (δηλαδή,  $R = 0,91$ , κατά μέσο όρο), υπήρχαν διαφορές μεταξύ των μεθόδων και ως εκ τούτου η επιλογής της κατάλληλης μεθόδου αποτελεί σημαντική πρόκληση στα ζητήματα επιλογής τοποθεσίας. Επιπλέον η ανάλυση ευαισθησίας στα βάρη, αποκάλυψε ότι η αλλαγή του βάρους της ηλιακής ακτινοβολίας έχει σημαντικό αντίκτυπο στον χάρτη εξόδου και των τριών μεθόδων και κατά συνέπεια είναι η πιο σημαντική.

Το άρθρο των Yilmaz et al. (2024) παρουσιάζει μια συστηματική μελέτη χωροθέτησης φωτοβολταϊκών στις περιοχές BURDUR, ISPARTA και ANTALYA. Η μελέτη χρησιμοποιεί τη Διαδικασία Ασαφούς Αναλυτικής Ιεραρχίας (FAHP) η οποία ανήκει στις μεθόδους Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων (MCDM), σε συνδυασμό με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) προκειμένου να εξάγει χωρικές πληροφορίες. Για την αξιολόγηση των περιοχών υιοθετήθηκαν 11 κριτήρια τα οποία σχετίζονται με κλιματολογικά, οικονομικά, τοπογραφικά και περιβαλλοντικά δεδομένα. Τα βάρη των κριτηρίων υπολογίστηκαν με τη μέθοδο FAHP, λαμβάνοντας υπόψη τις απόψεις των ειδικών, τη βιβλιογραφική επισκόπηση και τα αποτελέσματα της μηχανικής μάθησης. Στα συμπεράσματα της μελέτης επισημαίνεται

ότι οι κλιματικές μεταβλητές όπως η νέφωση και οι υδρατμοί ασκούν σημαντική επίδραση στην ενεργειακή απόδοση καθιστώντας τα ιδιαίτερα σημαντικά για την ενεργειακή απόδοση και την επιτυχία ενός φωτοβολταϊκού έργου.

Η μελέτη των Elboshy et al. (2022) παρουσιάζει μια συστηματική προσέγγιση χωροθέτησης φωτοβολταϊκών στην Αίγυπτο χρησιμοποιώντας την τεχνική λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDM) και ειδικότερα την αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (AHP) σε συνδυασμό με Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών GIS. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν είναι Μετεωρολογικά (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία), κλιματολογικά (ετήσια νέφωση, ηλιοφάνεια), τοποθεσίας (απόσταση από δίκτυα διανομής, απόσταση από αστικές περιοχές, απόσταση από μεγάλους δρόμους) και περιβαλλοντικά (υψόμετρο, κλίση εδάφους και σύσταση εδάφους). Αναφορικά με τη βαρύτητα που αποδίδεται στα εξεταζόμενα κριτήρια, αυτή προέκυψε από βιβλιογραφική έρευνα και με βάση τη γνώμη ειδικών. Στο τελικό αποτέλεσμα της μελέτης περιλαμβάνεται ένα χάρτης καταλληλότητας ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το στρατηγικό σχεδιασμό της Αιγύπτου.

Το άρθρο των Hassan et al. (2023) προτείνει ένα νέο υβριδικό πλαίσιο για την αξιολόγηση κατάλληλων τοποθεσιών και τεχνικών δυνατοτήτων για μεγάλης κλίμακας ηλιακά φωτοβολταϊκά πάρκα σε πέντε πόλεις της Σαουδική Αραβία. Η μελέτη χρησιμοποιεί την τεχνική λήψης αποφάσεων TOPSIS στα πλαίσια της οποίας ελέγχθηκαν πέντε κατηγορίες κριτηρίων και ειδικότερα κλιματολογικά (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία αέρα, ταχύτητα ανέμου, σχετική υγρασία, ηλιοφάνεια), τεχνικά (ενέργεια που εξάγεται στο δίκτυο, απώλειες συστήματος, απώλειες θερμοκρασίας), οικονομικά (ετήσια εξοικονόμηση κύκλου ζωής, σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, παρούσα αξία, περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου, έσοδα διάθεσης ενέργειας), κοινωνικά (πυκνότητα πληθυσμού), περιβαλλοντικά (εξοικονόμηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αποτροπή ρύπανσης). Τα βάρη των συντελεστών καθορίζονται με την τεχνική CRITIC. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο η βαρύτητα για κάθε κριτήριο δεν βασίζεται σε υποκειμενική κρίση αλλά στον βαθμό διαφοροποίησης (standard deviation) και το βαθμό σύγκρουσης / συσχέτισης μεταξύ των κριτηρίων (correlation coefficients). Στα συμπεράσματα της μελέτης καταγράφεται ότι η μέθοδος είναι αξιόπιστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε περιοχή υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών έργων.

Το ζήτημα της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων μελετάται στη βιβλιογραφία συνδυαστικά και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η μελέτη των Mbufua et al. (2025) μελετά τη βέλτιστη τοποθεσία για την εγκατάσταση υβριδικού συστήματος ηλιακής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και αιολικής ενέργειας, στην

περιοχή Koung-Khi της Δυτικής Περιφέρειας του Καμερούν. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ανέλυσε κριτήρια τριών θεματικών ομάδων και ειδικότερα υδρογεωμορφολογικά, τοπίου – τοπογραφίας και κοινωνικοοικονομικά. Στα πλαίσια της αξιολόγησης εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι AHP, η PROMETHEE και η TOPSIS σε περιβάλλον GIS. Η μεθοδολογία οργανώνεται σε γεωχωρικό πλαίσιο, όπου τα δεδομένα μετατρέπονται σε raster χάρτες, κατηγοριοποιούνται σε πέντε κλάσεις καταλληλότητας και σταθμίζονται σύμφωνα με τις ώστε να παραχθούν χάρτες καταλληλότητας και συγκριτικά αποτελέσματα μέσω των μεθόδων αξιολόγησης. Η επιλογή των κριτηρίων βασίστηκε σε προηγούμενη έρευνα και αξιολογήσεις εμπειρογνομώνων.

Το άρθρο των Qi et al. (2026) παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη χωροθέτηση και τη διαμόρφωση βέλτιστης διάταξης φωτοβολταϊκών σε ορεινό περιβάλλον συνδυαστικά με τον υδροηλεκτρικό σταθμό Lianghekou στην Κίνα. Η μελέτη εστιάζει στην εκτίμηση της απόδοσης, του κόστους και των οικονομικών δεικτών σε πολύπλοκο γεωγραφικό περιβάλλον. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται περιλαμβάνει ένα συνδυαστικό μοντέλο με τέσσερα στάδια. Αρχικά επιλέγεται η περιοχή μελέτης και ακολούθως αξιολογείται η καταλληλότητα θέσεων για εγκατάσταση PV με τη χρήση Geographic Information System - Analytic Hierarchy Process (GIS-AHP). Σε τρίτο στάδιο πραγματοποιείται βελτιστοποίηση της διάταξης των φωτοβολταϊκών μονάδων με επεξεργασία raster εικόνων και suitability thresholds και τέλος πραγματοποιείται ολοκληρωμένη ανάλυση της απόδοσης με δείκτες όπως η ετήσια παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, το σταθεροποιημένο κόστος ενέργειας (LCOE) και ο χρόνος αποπληρωμής (PBP).

Τέλος, το άρθρο των Gao et al. (2026) εστιάζει στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη χωροθέτηση υβριδικών ενεργειακών συστημάτων αιολικής - φωτοβολταϊκής ενέργειας με κοινή αποθήκευση, λαμβάνοντας υπόψη την ανθεκτικότητα του ενεργειακού συστήματος. Η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία αποτελεί συνδυασμό των μεθόδων EAHP, CRITIC και TOPSIS.

## 5.5 Συμπεράσματα

Η επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας καταδεικνύει ότι η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάρκων αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα, για την αντιμετώπιση του οποίου έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί πλήθος μεθοδολογικών προσεγγίσεων. Κυρίαρχη τάση αποτελεί ο συνδυασμός Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών με μεθόδους πολυκριτηριακής

λήψης αποφάσεων, γεγονός που επιτρέπει τόσο τη χωρική επεξεργασία των δεδομένων όσο και τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών υποψήφιων θέσεων.

Από τις εξεταζόμενες μελέτες προκύπτει επίσης ότι δεν υπάρχει μία ενιαία μεθοδολογία ή ένα καθολικό σύνολο κριτηρίων που να μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από τη γεωγραφική περιοχή και το αντικείμενο της εκάστοτε έρευνας. Αντίθετα, οι ερευνητικές προσεγγίσεις διαφοροποιούνται ως προς τα κριτήρια, τη διαδικασία προσδιορισμού των βαρών, τη μέθοδο κατάταξης και τον τρόπο ενσωμάτωσης της χωρικής πληροφορίας. Η παρατήρηση αυτή είναι συμβατή με τα συμπεράσματα των συστηματικών ανασκοπήσεων, οι οποίες επισημαίνουν τον μεθοδολογικό κατακερματισμό του πεδίου και την ανάγκη για συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών προσεγγίσεων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία παρουσιάζει το γεγονός ότι, παρά την κυριαρχία των πολυκριτηριακών μοντέλων που συνδυάζουν μετεωρολογικά, περιβαλλοντικά, τεχνικά, οικονομικά και χωρικά κριτήρια, υπάρχουν και ερευνητικές εφαρμογές στις οποίες οι μετεωρολογικές παράμετροι αποτελούν τον βασικό πυρήνα της αξιολόγησης. Η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία, η νέφωση, η ηλιοφάνεια και η ταχύτητα του ανέμου αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταβλητών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτίμηση του ενεργειακού δυναμικού διαφορετικών περιοχών. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία διαφοροποιείται ως προς το εύρος των κριτηρίων που ενσωματώνει. Ενώ μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας αντιμετωπίζει τη χωροθέτηση ως συνολικό πρόβλημα τεχνικής, περιβαλλοντικής, οικονομικής και χωρικής καταλληλότητας, η παρούσα μελέτη περιορίζει σκόπιμα το αντικείμενο στην αξιολόγηση της μετεωρολογικής καταλληλότητας των υποψήφιων θέσεων. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιείται η μέθοδος πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων PROMETHEE, με κριτήρια που προέρχονται αποκλειστικά από μετεωρολογικές παραμέτρους.

Επομένως, η κατάταξη που προκύπτει από την εφαρμογή της PROMETHEE δεν θα πρέπει να ερμηνεύεται ως πλήρης χωροταξική ή αδειοδοτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων θέσεων. Αντιθέτως, εκφράζει τη σχετική προτίμηση των θέσεων ως προς το μετεωρολογικό τους προφίλ και, κατ' επέκταση, ως προς τις συνθήκες που συνδέονται με το ηλιακό ενεργειακό δυναμικό. Η διάκριση αυτή επιτρέπει την ακριβή οριοθέτηση της συμβολής της παρούσας εργασίας σε σχέση με την ευρύτερη βιβλιογραφία της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων.

## **6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE στην αξιολόγηση της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων με βάση μετεωρολογικά κριτήρια.**

### **6.1 Διατύπωση προβλήματος**

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η καταλληλότητα επτά διαφορετικών τοποθεσιών για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πάρκων καθαρά με βάση τα μετεωρολογικά τους χαρακτηριστικά και εφαρμογή της μεθόδου Promethee. Κάθε άλλη παράμετρος που μπορεί να έχει επίδραση στην καταλληλότητα των θέσεων θεωρείται ότι ταυτίζεται στις εν λόγω θέσεις.

Οι εν λόγω επιλεγόμενες θέσεις σύμφωνα με την υπόθεση βρίσκονται πλησίον των μετεωρολογικών σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στις περιοχές Τυμπακίου , Ρόδου , Σαντορίνης , Ηρακλείου , Καλαμάτας , Λάρισας και Καστοριάς. Οι θέσεις αυτές επιλέχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχουν καταγεγραμμένα μετεωρολογικά δεδομένα για το σύνολο των εξεταζόμενων παραγόντων και ταυτόχρονα παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφοροποιημένο δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά σύμφωνα με τους χάρτες της SolarGIS εκτός τις θέσεις Λάρισας και Καστοριάς που παρουσιάζουν το ίδιο ηλιακό δυναμικό.

Οι εξεταζόμενες παράμετροι είναι η ηλιακή ακτινοβολία , η ηλιοφάνεια , ο άνεμος , η υγρασία και η θερμοκρασία. Η επίδραση (θετική /αρνητική) των παραμέτρων στο πρόβλημα καθώς και οι συντελεστές βαρύτητας που εξετάζονται , προκύπτουν από βιβλιογραφική έρευνα. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται σε 3 στάδια.

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η επίλυση του προβλήματος με χρήση συντελεστών βαρύτητας που προκύπτουν από την επεξεργασία βιβλιογραφικών δεδομένων στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης. Στο δεύτερο στάδιο επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί χρησιμοποιώντας τους συντελεστές βαρύτητας που προτείνονται στη βιβλιογραφία από τους Karadöl & Yildirim (2025). Στο τρίτο στάδιο τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω αναλύσεων συγκρίνονται με την κατάταξη που προκύπτει από την εκτίμηση του δυναμικού παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας,

## 6.2. Περιγραφή του ελληνικού κλίματος

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της ΕΜΥ, το κλίμα της Ελλάδας είναι τυπικά μεσογειακό: ήπιοι και υγροί χειμώνες, σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια και, γενικά, μακρές περίοδοι ηλιοφάνειας κατά την μεγαλύτερη διάρκεια του έτους.

Η Ελλάδα βρίσκεται μεταξύ των παραλλήλων 34ο και 42ο του Βορείου ημισφαιρίου και βρέχεται από την Ανατολική Μεσόγειο. Το κλίμα της έχει σε γενικές γραμμές τα χαρακτηριστικά του Μεσογειακού κλίματος, δηλαδή ήπιους και βροχερούς χειμώνες, σχετικώς θερμά και ξηρά καλοκαίρια και μεγάλη ηλιοφάνεια όλο σχεδόν το χρόνο.

Λεπτομερέστερα στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας παρουσιάζεται μια μεγάλη ποικιλία κλιματικών τύπων, πάντα βέβαια μέσα στα πλαίσια του Μεσογειακού κλίματος. Αυτό οφείλεται στην τοπογραφική διαμόρφωση της χώρας που έχει μεγάλες διαφορές υψομέτρου (υπάρχουν μεγάλες οροσειρές κατά μήκος της κεντρικής χώρας και άλλοι ορεινοί όγκοι) και εναλλαγή ξηράς και θάλασσας. Έτσι από το ξηρό κλίμα της Αττικής και γενικά της Ανατολικής Ελλάδας μεταπίπτουμε στο υγρό της Βόρειας και Δυτικής Ελλάδας. Τέτοιες κλιματικές διαφορές συναντώνται ακόμη και σε τόπους που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, πράγμα που παρουσιάζεται σε λίγες μόνο χώρες σε όλο τον κόσμο.

Από κλιματολογικής πλευράς το έτος μπορεί να χωριστεί κυρίως σε δύο εποχές: Την ψυχρή και βροχερή χειμερινή περίοδο που διαρκεί από τα μέσα του Οκτωβρίου και μέχρι το τέλος Μαρτίου και τη θερμή και άνομβρη εποχή που διαρκεί από τον Απρίλιο έως τον Οκτώβριο.

Κατά την πρώτη περίοδο οι ψυχρότεροι μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος, όπου κατά μέσον όρο η μέση ελάχιστη θερμοκρασία κυμαίνεται από 5-10 °C στις παραθαλάσσιες περιοχές, από 0 - 5 °C στις ηπειρωτικές περιοχές και με χαμηλότερες τιμές κάτω από το μηδέν στις βόρειες περιοχές.

Οι βροχές στη χώρα μας ακόμη και τη χειμερινή περίοδο δεν διαρκούν για πολλές ημέρες και ο ουρανός της Ελλάδας δεν μένει συννεφιασμένος για αρκετές συνεχόμενες ημέρες, όπως συμβαίνει σε άλλες περιοχές της γης. Οι χειμερινές κακοκαιρίες διακόπτονται συχνά κατά τον Ιανουάριο και το πρώτο δεκαπενθήμερο του Φεβρουαρίου από ηλιόλουστες ημέρες, τις γνωστές από την αρχαιότητα "Αλκυονίδες ημέρες".

Η χειμερινή εποχή είναι γλυκύτερη στα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου από ό,τι στη Βόρεια και Ανατολική Ελλάδα. Κατά τη θερμή και άνομβρη εποχή ο καιρός είναι σταθερός,

ο ουρανός σχεδόν αίθριος, ο ήλιος λαμπερός και δεν βρέχει εκτός από σπάνια διαλείμματα με ραγδαίες βροχές ή καταιγίδες μικρής όμως διάρκειας.

Η θερμότερη περίοδος είναι το τελευταίο δεκαήμερο του Ιουλίου και το πρώτο του Αυγούστου οπότε η μέση μέγιστη θερμοκρασία κυμαίνεται από 29 °C μέχρι 35 °C. Κατά τη θερμή εποχή οι υψηλές θερμοκρασίες μετριάζονται από τη δροσερή θαλάσσια αύρα στις παράκτιες περιοχές της χώρας και από τους βόρειους ανέμους ( ετησίες ) που φυσούν κυρίως στο Αιγαίο.

Η Άνοιξη έχει μικρή διάρκεια , διότι ο μεν Χειμώνας είναι όψιμος, το δε καλοκαίρι αρχίζει πρώιμα. Το Φθινόπωρο είναι μακρύ και θερμό και πολλές φορές παρατείνεται στη Νότια Ελλάδα και μέχρι τα μισά του Δεκεμβρίου.

Κατά την πρώτη περίοδο οι ψυχρότεροι μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος, όπου κατά μέσον όρο η μέση ελάχιστη θερμοκρασία κυμαίνεται από 5-10 °C στις παραθαλάσσιες περιοχές, από 0 - 5 °C στις ηπειρωτικές περιοχές και με χαμηλότερες τιμές κάτω από το μηδέν στις βόρειες περιοχές.

Οι βροχές στη χώρα μας ακόμη και τη χειμερινή περίοδο δεν διαρκούν για πολλές ημέρες και ο ουρανός της Ελλάδας δεν μένει συνεφιασμένος για αρκετές συνεχόμενες ημέρες, όπως συμβαίνει σε άλλες περιοχές της γης. Οι χειμερινές κακοκαιρίες διακόπτονται συχνά κατά τον Ιανουάριο και το πρώτο δεκαπενθήμερο του Φεβρουαρίου από ηλιόλουστες ημέρες, τις γνωστές από την αρχαιότητα "Αλκυονίδες ημέρες".

Η χειμερινή εποχή είναι γλυκύτερη στα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου από ό,τι στη Βόρεια και Ανατολική Ελλάδα.

Κατά τη θερμή και άνομβρη εποχή ο καιρός είναι σταθερός , ο ουρανός σχεδόν αίθριος, ο ήλιος λαμπερός και δεν βρέχει εκτός από σπάνια διαλείμματα με ραγδαίες βροχές ή καταιγίδες μικρής όμως διάρκειας.

Η θερμότερη περίοδος είναι το τελευταίο δεκαήμερο του Ιουλίου και το πρώτο του Αυγούστου οπότε η μέση μέγιστη θερμοκρασία κυμαίνεται από 29 °C μέχρι 35 °C. Κατά τη θερμή εποχή οι υψηλές θερμοκρασίες μετριάζονται από τη δροσερή θαλάσσια αύρα στις παράκτιες περιοχές της χώρας και από τους βόρειους ανέμους ( ετησίες ) που φυσούν κυρίως στο Αιγαίο.

Η Άνοιξη έχει μικρή διάρκεια , διότι ο μεν Χειμώνας είναι όψιμος, το δε καλοκαίρι αρχίζει πρώιμα. Το Φθινόπωρο είναι μακρύ και θερμό και πολλές φορές παρατείνεται στη Νότια Ελλάδα και μέχρι τα μισά του Δεκεμβρίου.

### 6.3. Πηγές δεδομένων

#### 6.3.1. Μετεωρολογικοί σταθμοί της EMY

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της EMY , η μετεωρολογία βασίζεται σε διάφορα συστήματα παρατήρησης για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τα καιρικά μοτίβα. Αυτά τα συστήματα παρέχουν βασικές πληροφορίες για την πρόγνωση του καιρού, την παρακολούθηση του κλίματος και την επιστημονική έρευνα.

Μερικά από βασικά συστήματα παρατήρησης στη μετεωρολογία περιλαμβάνουν μετεωρολογικούς σταθμούς, μετεωρολογικά ραντάρ , μετεωρολογικούς δορυφόρους , μετεωρολογικά μπαλόνια, Lidar και Ceilometers , επιφανειακές καιρικές παρατηρήσεις και θαλάσσιους σημαντήρες.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία προέρχονται από μετεωρολογικούς σταθμούς οι οποίοι κατατάσσονται στους ακόλουθους τύπους.

*ΑΜΣ – Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός.* Τύπος μετεωρολογικού σταθμού που μετρά αυτόματα μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως θερμοκρασία, επίπεδα υγρασίας, ταχύτητα ανέμου και βροχόπτωση, χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης παρέμβασης.

*ΠΑΜΣ – Περιβαλλοντικός Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός.* Τύπος αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού που χρησιμοποιείται για τη συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων, όπως θερμοκρασία, επίπεδα υγρασίας, ταχύτητα ανέμου και ατμοσφαιρική πίεση.

#### 6.3.2. Χάρτες ηλιακών πόρων

##### 6.3.2.1 Χάρτης οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας

Αυτός ο χάρτης ηλιακών πόρων παρέχει μια σύνοψη της εκτιμώμενης ηλιακής ενέργειας που είναι διαθέσιμη για την παραγωγή ενέργειας και άλλες ενεργειακές εφαρμογές. Αντιπροσωπεύει το μέσο ημερήσιο/ετήσιο άθροισμα της παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας (GHI) που καλύπτει μια περίοδο 25 τελευταίων ετών (1994-2018).

Η υποκείμενη βάση δεδομένων ηλιακών πόρων υπολογίζεται από το μοντέλο Solargis από ατμοσφαιρικά και δορυφορικά δεδομένα με βήμα 15 λεπτών και 30 λεπτών. Οι επιπτώσεις του εδάφους λαμβάνονται υπόψη σε ονομαστική χωρική ανάλυση 250 m.

Σημειώνεται ότι υπάρχει κάποια αβεβαιότητα στην ετήσια εκτίμηση GHI ως αποτέλεσμα των περιορισμένων δυνατοτήτων για περιφερειακή επικύρωση μοντέλου λόγω έλλειψης δεδομένων μέτρησης εδάφους υψηλής ποιότητας, τα οποία εκτιμάται ότι ποικίλλουν περιφερειακά από περίπου 4% έως 6%.

Η GHI είναι η πιο σημαντική παράμετρος για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης και την αξιολόγηση της απόδοσης των τεχνολογιών επίπεδης φωτοβολταϊκής (PV).

Η λήψη του ανωτέρω χάρτη πραγματοποιήθηκε από τον ιστότοπο <https://solargis.com> και διατίθεται ελεύθερα με άδεια CC BY-SA 4.0.

#### 6.3.2.2 Χάρτης δυναμικού φωτοβολταϊκής ισχύος

Αυτός ο χάρτης ηλιακών πόρων παρέχει μια σύνοψη του εκτιμώμενου δυναμικού παραγωγής ηλιακής φωτοβολταϊκής (Φ/Β) ενέργειας. Αντιπροσωπεύει τα μέσα ημερήσια/ετήσια σύνολα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από έναν ηλιακό φωτοβολταϊκό σταθμό ισχύος 1 KW συνδεδεμένο στο δίκτυο αιχμής, υπολογιζόμενο για μια περίοδο 25 τελευταίων ετών (1994-2018).

Η διαμόρφωση του Φ/Β συστήματος αποτελείται από επίγειες, ανεξάρτητες κατασκευές με κρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια πυριτίου τοποθετημένα σε σταθερή θέση, με βέλτιστη κλίση για μεγιστοποίηση της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης. Προβλέπεται η χρήση μετατροπέων υψηλής απόδοσης. Ο υπολογισμός της ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε δεδομένα ηλιακών πόρων υψηλής ανάλυσης και σε λογισμικό μοντελοποίησης Φ/Β που παρέχεται από την Solar Gis.

Ο υπολογισμός λαμβάνει υπόψη την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα και το έδαφος, για την προσομοίωση της μετατροπής ενέργειας και των απωλειών στα Φ/Β πλαίσια και σε άλλα εξαρτήματα ενός Φ/Β σταθμού. Στην προσομοίωση, οι απώλειες λόγω σκόνης και σιλικόνης εκτιμήθηκαν σε 3,5%. Η σωρευτική επίδραση άλλων απωλειών μετατροπής (σκίαση μεταξύ σειρών, αναντιστοιχία, μετατροπείς, μετασχηματιστές καλωδίων κ.λπ.)

θεωρείται ότι είναι 7,5%. Η διαθεσιμότητα του σταθμού παραγωγής ενέργειας θεωρείται 100%.

Η υποκείμενη βάση δεδομένων ηλιακών πόρων υπολογίζεται από ατμοσφαιρικά και δορυφορικά δεδομένα με χρονικό βήμα 15 λεπτών και 3 λεπτών και χωρική ανάλυση 1000 m.

Η λήψη του ανωτέρω χάρτη πραγματοποιήθηκε από τον ιστότοπο <https://solargis.com> και διατίθεται ελεύθερα με άδεια CC BY-SA 4.0.

## **6.4 Καθορισμός των εξεταζόμενων θέσεων και περιγραφή των μετεωρολογικών δεδομένων τους.**

### **6.4.1 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου**

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στη θέση Τυμπάκι προέρχονται από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες WGS 84 (35.06658 , 24.76227) και σε υψόμετρο 07.52 μ.

Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται στο χώρο του αεροδρομίου Τυμπακίου.

Με βάση την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα στατιστικά στοιχεία της EMY και τους χάρτες ηλιακών πόρων © 2021 Solargis τα μετεωρολογικά δεδομένα της θέσης έχουν ως εξής:

Μέση ετήσια θερμοκρασία = 19.17 °C

Μέση ετήσια υγρασία = 64,58%

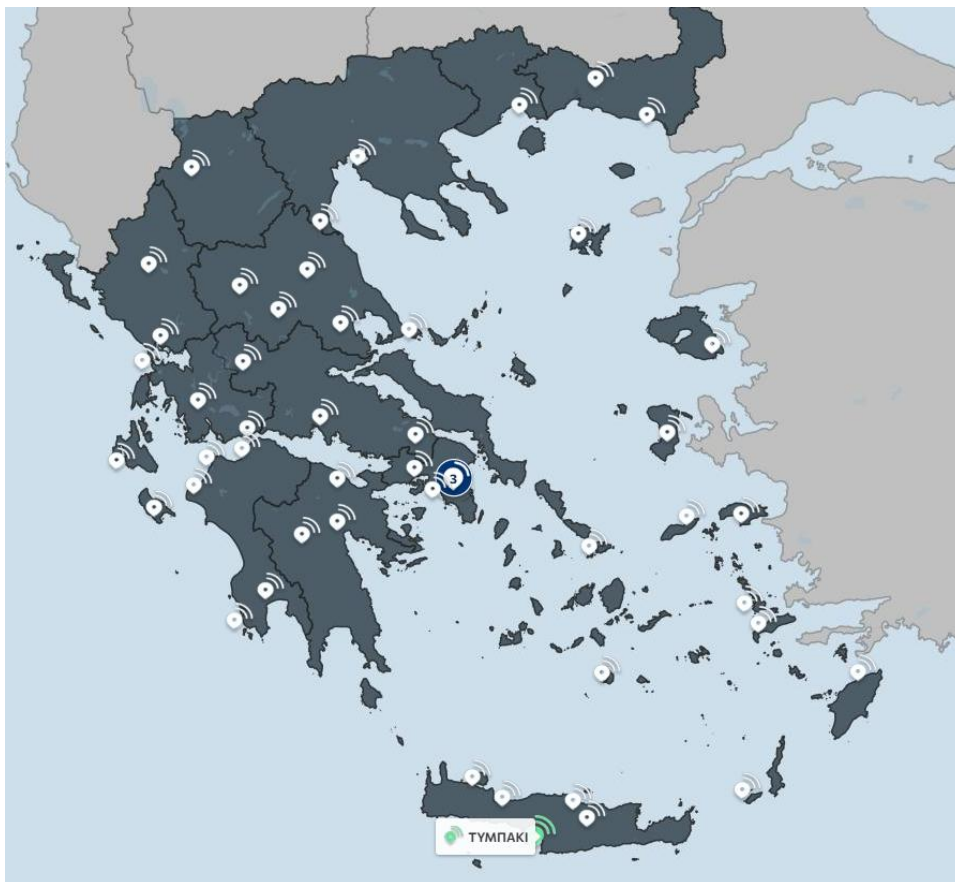
Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου = 7,42 m/s

Μέγιστη ταχύτητα ανέμου 46 m/s

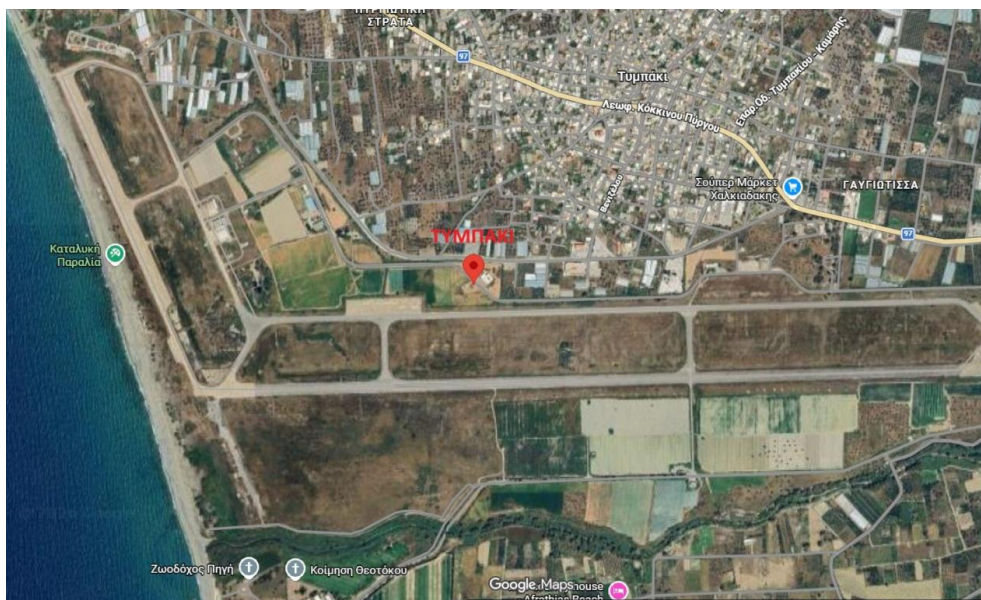
Μέση ετήσια ηλιοφάνεια = 8.17 hrs

Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία = 1899 kWh/m<sup>2</sup>

Ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/B = 1.716 Kwh/kWp



Εικόνα 15 Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: ΕΜΥ)



Εικόνα 16 Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <https://www.google.com/maps>, ανάκτηση 16-02-2026)



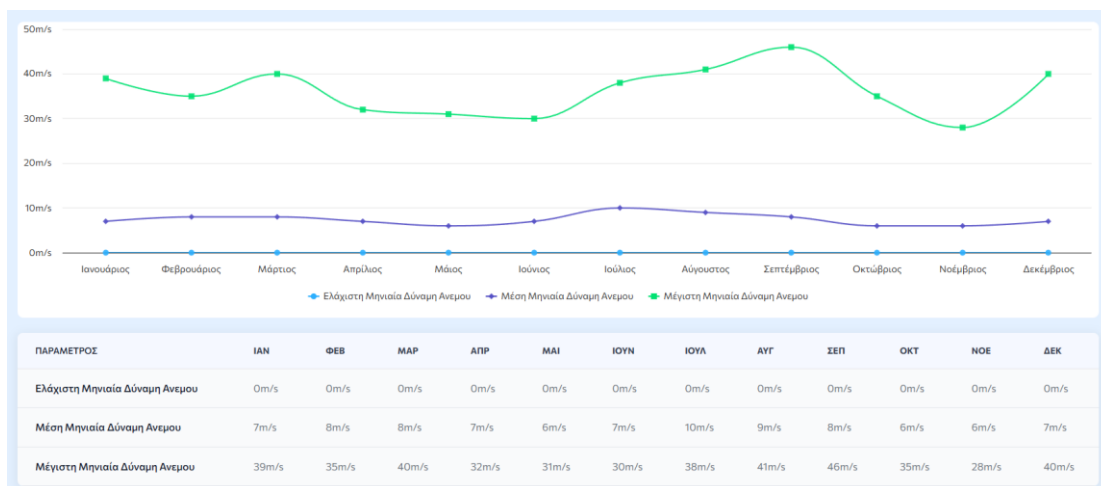
Εικόνα 17 Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 18 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 19 Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY)

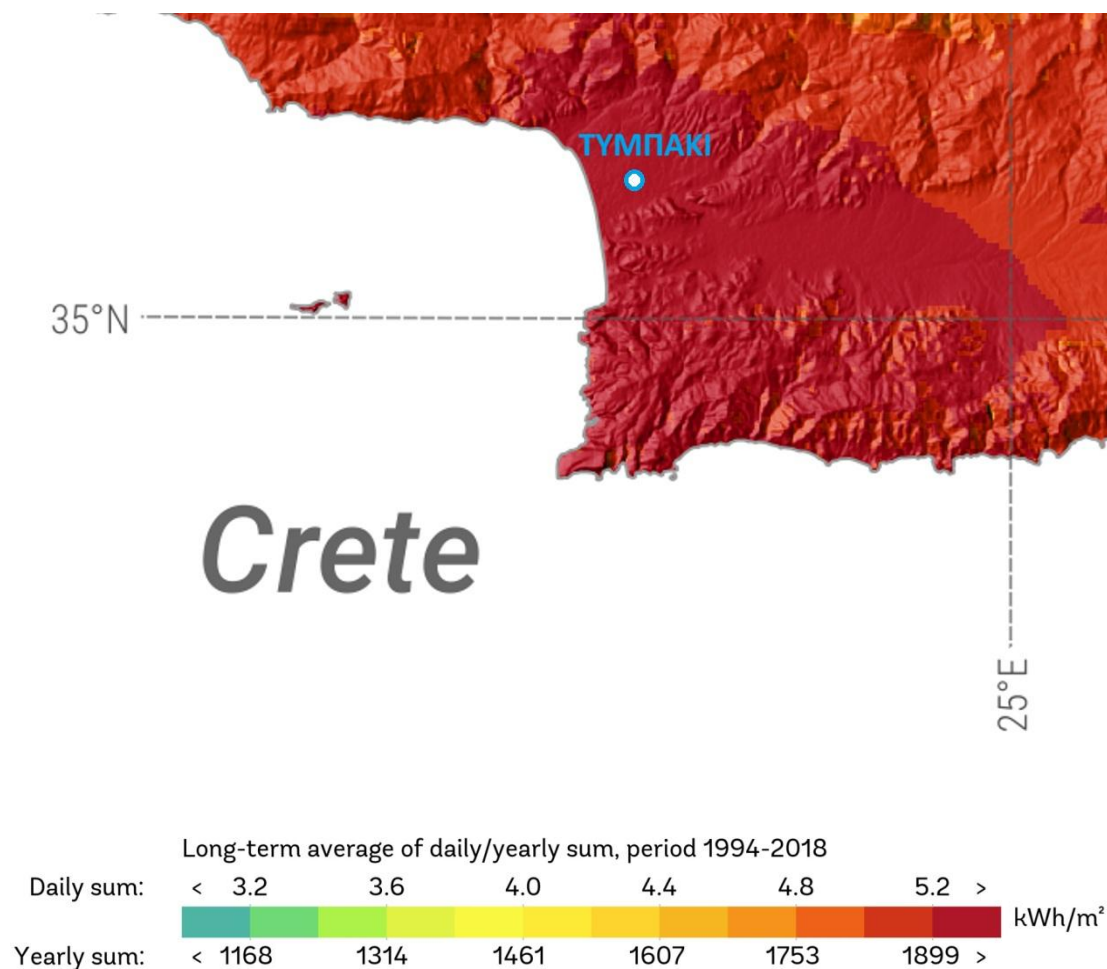


Εικόνα 20 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: EMY)

| ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΑΘΜΟΥ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ |     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |                    |
|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| ΤΥΜΠΑΚΙ                                  | ΙΑΝ | ΦΕΒ | ΜΑΡ | ΑΠΡ | ΜΑΙ | ΙΟΥΝ | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ | ΣΕΠ | ΟΚΤ | ΝΟΕ | ΔΕΚ | ΕΤΗΣΙΩΣ            |
| Μέση μηνιαία θερμοκρασία (C°)            | 12  | 12  | 13  | 17  | 21  | 25   | 28   | 28  | 25  | 20  | 16  | 13  | 19,17 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία υγρασία (%)                 | 73  | 72  | 70  | 68  | 64  | 57   | 51   | 52  | 59  | 65  | 71  | 73  | 64,58 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)       | 7   | 8   | 8   | 7   | 6   | 7    | 10   | 9   | 8   | 6   | 6   | 7   | 7,42 Μέση τιμή     |
| Μέγιστη μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)    | 39  | 35  | 40  | 32  | 31  | 30   | 38   | 41  | 46  | 35  | 28  | 40  | 46,00 Μέγιστη τιμή |
| Μέση Μηνιαία Ηλιοφάνεια (hrs)            | 5   | 5   | 7   | 8   | 10  | 12   | 12   | 12  | 9   | 7   | 6   | 5   | 8,17 Μέση τιμή     |

Εικόνα 21 Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Τυμπακίου, με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα)

## ΧΑΡΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

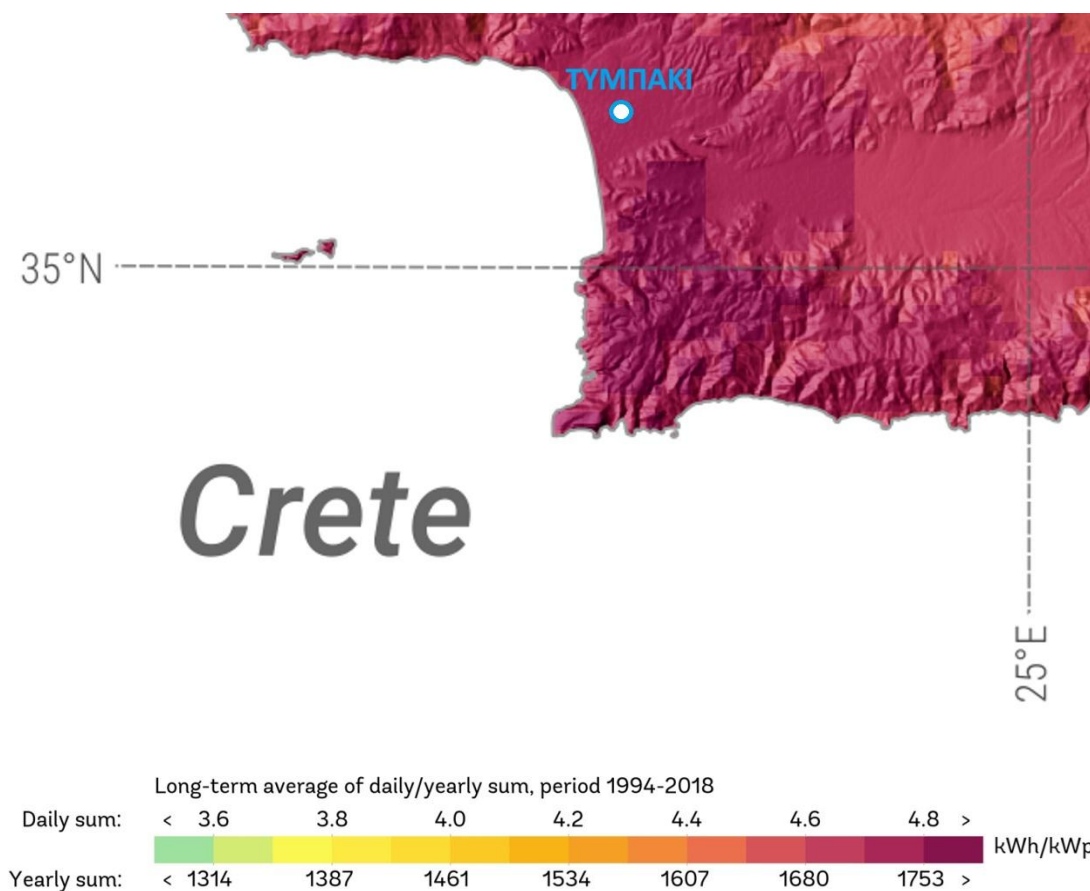


*Note.* Adapted from “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece,” © 2021 by Solargis (<https://solargis.com>). Licensed under CC BY-SA 4.0.

Εικόνα 22 Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου, λαμβάνεται μέση ημερήσια οριζόντια ακτινοβολία 5,2 kWh/m<sup>2</sup> και ετήσια οριζόντια ακτινοβολία 1899 kWh/m<sup>2</sup>.

## ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 23 Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Τυμπακίου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Τυμπακίου, λαμβάνεται μέσο ημερήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 4,7 kWh/ kWp και ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 1716 kWh/ kWp .

#### 6.4.2 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στη θέση Ρόδος προέρχονται από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες WGS 84 (36.40800 , 28.09980) και σε υψόμετρο 3.49 μ.

Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται στο χώρο του αεροδρομίου Ρόδου.

Με βάση την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα στατιστικά στοιχεία της ΕΜΥ και τους χάρτες ηλιακών πόρων © 2021 Solargis τα μετεωρολογικά δεδομένα της θέσης έχουν ως εξής:

Μέση ετήσια θερμοκρασία = 19.33 °C

Μέση ετήσια υγρασία = 66,67%

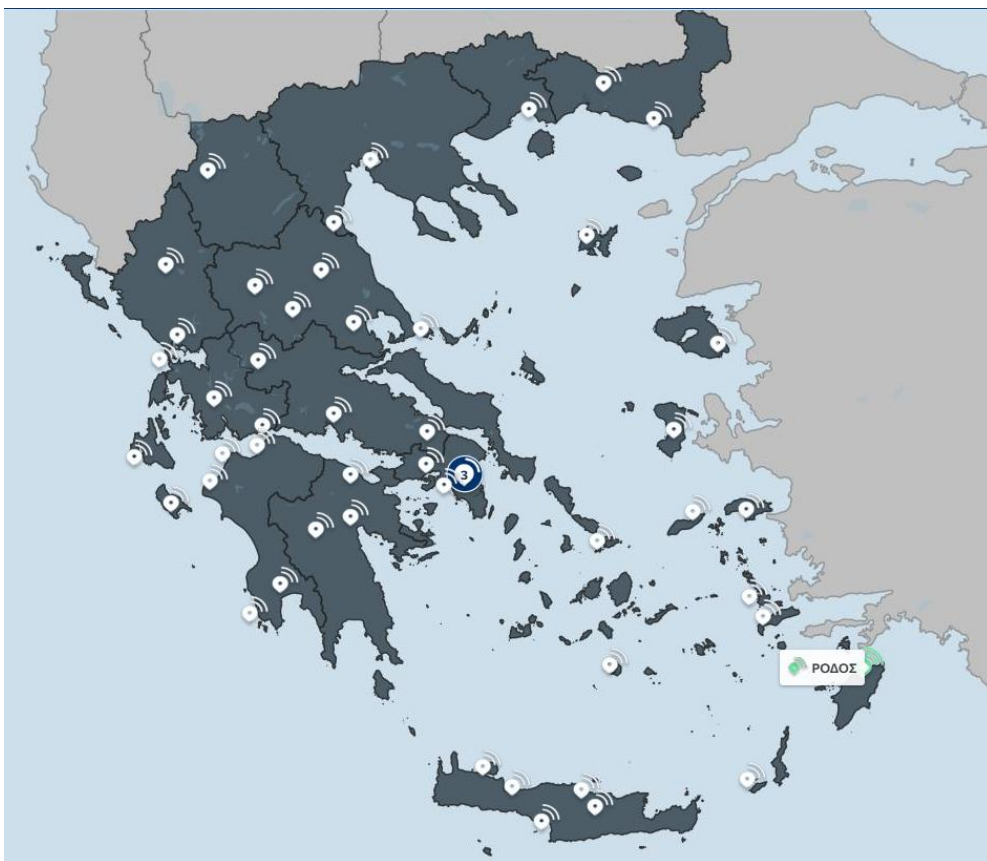
Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου = 9,08 m/s

Μέγιστη ταχύτητα ανέμου 40 m/s

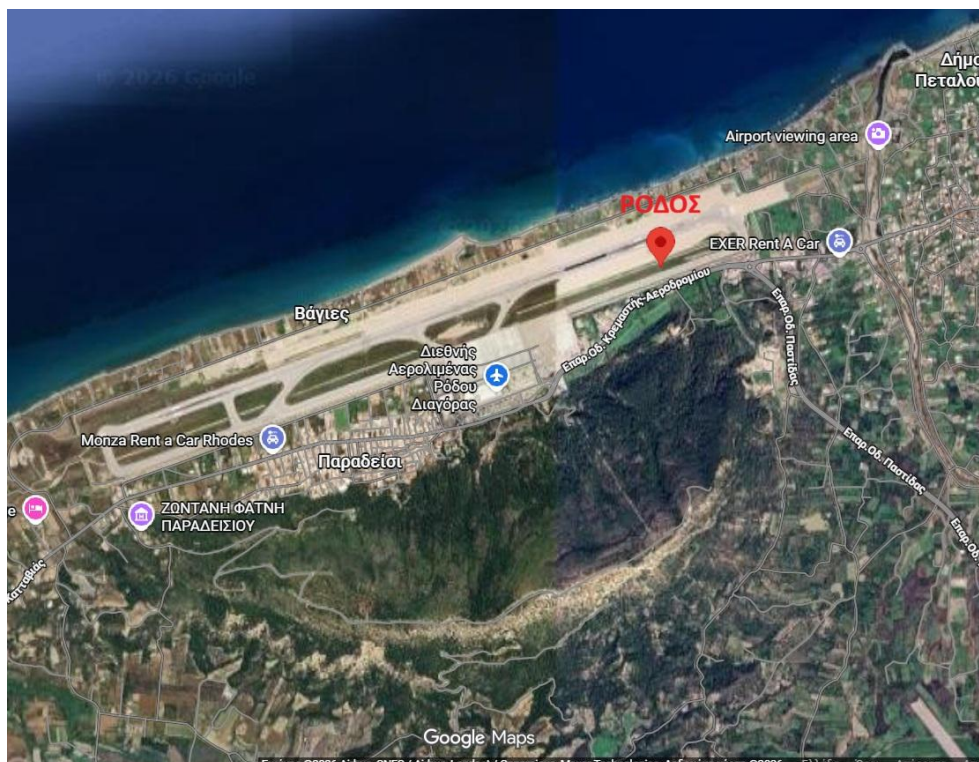
Μέση ετήσια ηλιοφάνεια = 8,67 hrs

Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία = 1.826 kWh/m<sup>2</sup>

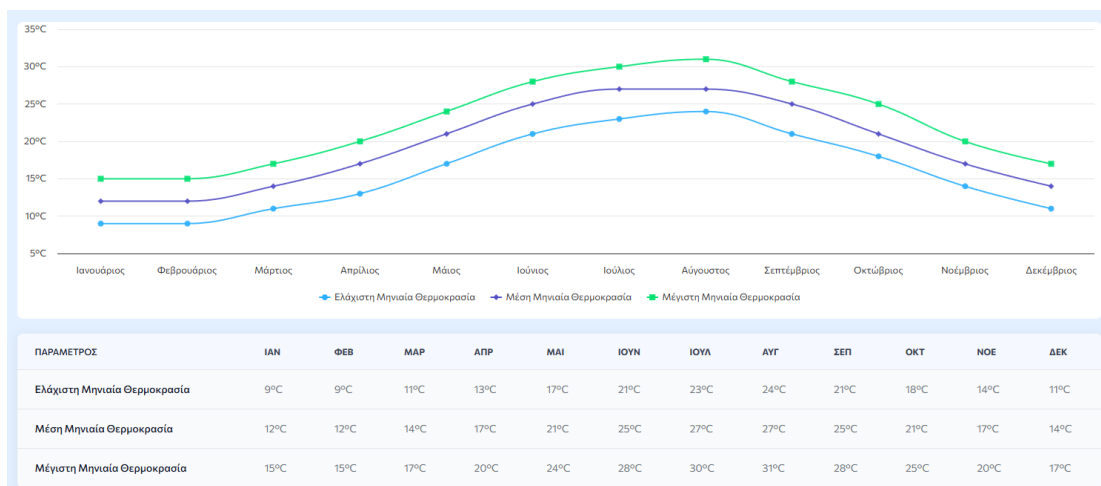
Ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/B = 1.680 Kwh/kWp



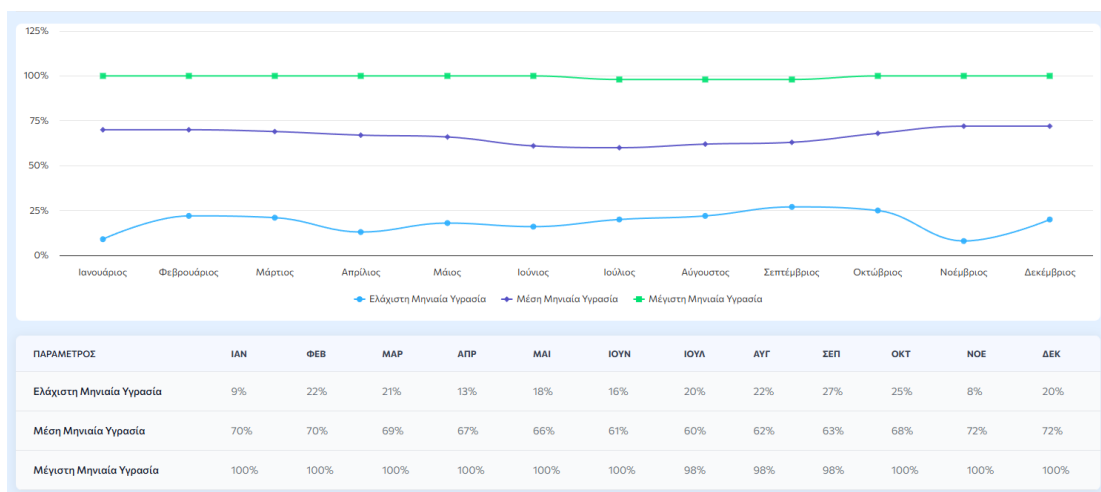
Εικόνα 24 Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 25 Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 26 Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY)



Εικόνα

Εικόνα 27 Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 28 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY)

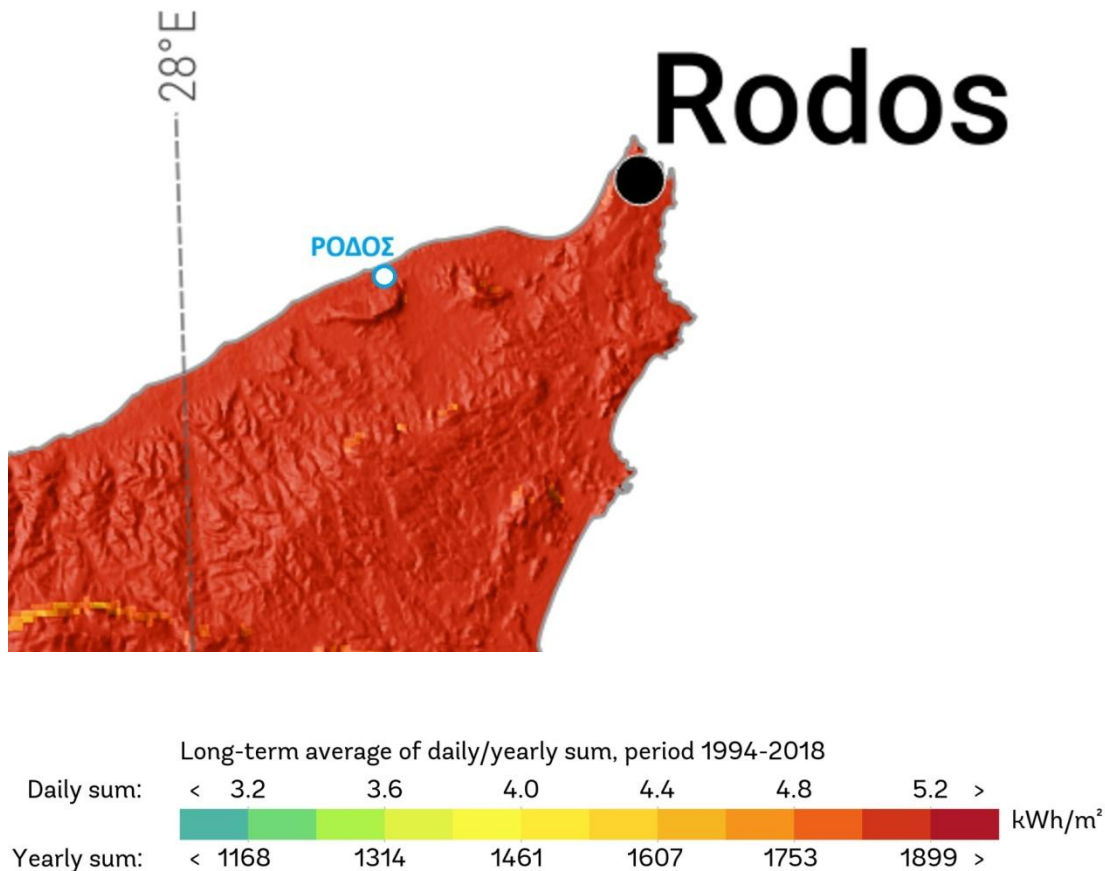


Εικόνα 29 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: EMY)

| ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΑΘΜΟΥ ΡΟΔΟΥ  |     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |                    |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| ΡΟΔΟΣ                                 | ΙΑΝ | ΦΕΒ | ΜΑΡ | ΑΠΡ | ΜΑΗ | ΙΟΥΝ | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ | ΣΕΠ | ΟΚΤ | ΝΟΕ | ΔΕΚ | ΕΤΗΣΙΩΣ            |
| Μέση μηνιαία θερμοκρασία (C°)         | 12  | 12  | 14  | 17  | 21  | 25   | 27   | 27  | 25  | 21  | 17  | 14  | 19,33 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία υγρασία (%)              | 70  | 70  | 69  | 67  | 66  | 61   | 60   | 62  | 63  | 68  | 72  | 72  | 66,67 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)    | 8   | 8   | 9   | 9   | 9   | 11   | 13   | 12  | 10  | 7   | 6   | 7   | 9,08 Μέση τιμή     |
| Μέγιστη μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s) | 38  | 40  | 39  | 35  | 30  | 28   | 26   | 25  | 25  | 31  | 33  | 40  | 40,00 Μέγιστη τιμή |
| Μέση Μηνιαία Ηλιοφάνεια (hrs)         | 5   | 6   | 7   | 9   | 11  | 12   | 13   | 12  | 10  | 8   | 6   | 5   | 8,67 Μέση τιμή     |

Εικόνα 30 Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Ρόδου, με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα)

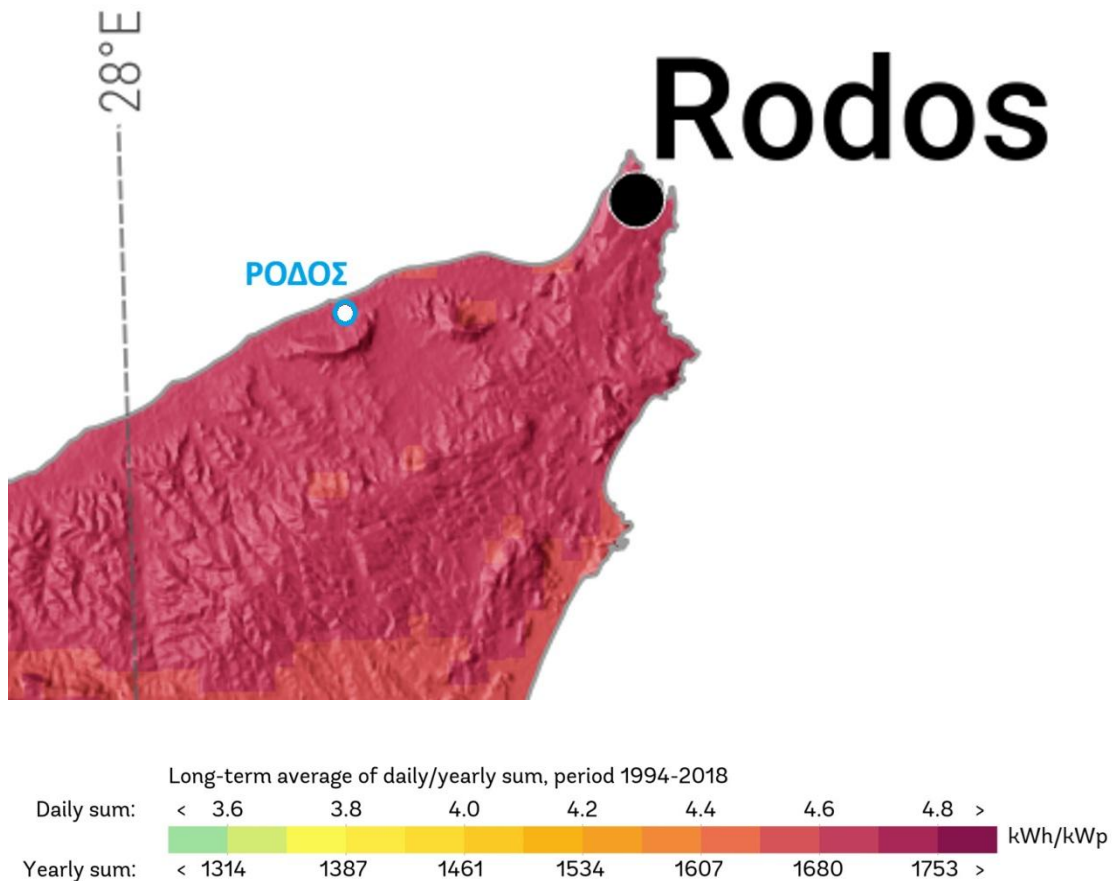
## ΧΑΡΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου, λαμβάνεται μέση ημερήσια οριζόντια ακτινοβολία 5,0 kWh/m<sup>2</sup> και ετήσια οριζόντια ακτινοβολία 1826 kWh/m<sup>2</sup>.

Εικόνα 31 Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

## ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 32 Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Ρόδου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Ρόδου, λαμβάνεται μέσο ημερήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 4,6 kWh/ kWp και ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 1780 kWh/ kWp

### 6.4.3 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στη θέση Σαντορίνη προέρχονται από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες WGS 84 (36.39265 , 25.48113) και σε υψόμετρο 17.00 μ.

Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται στο χώρο του αεροδρομίου Σαντορίνης.

Με βάση την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα στατιστικά στοιχεία της ΕΜΥ και τους χάρτες ηλιακών πόρων © 2021 Solargis τα μετεωρολογικά δεδομένα της θέσης έχουν ως εξής:

Μέση ετήσια θερμοκρασία = 18,50 °C

Μέση ετήσια υγρασία = 67%

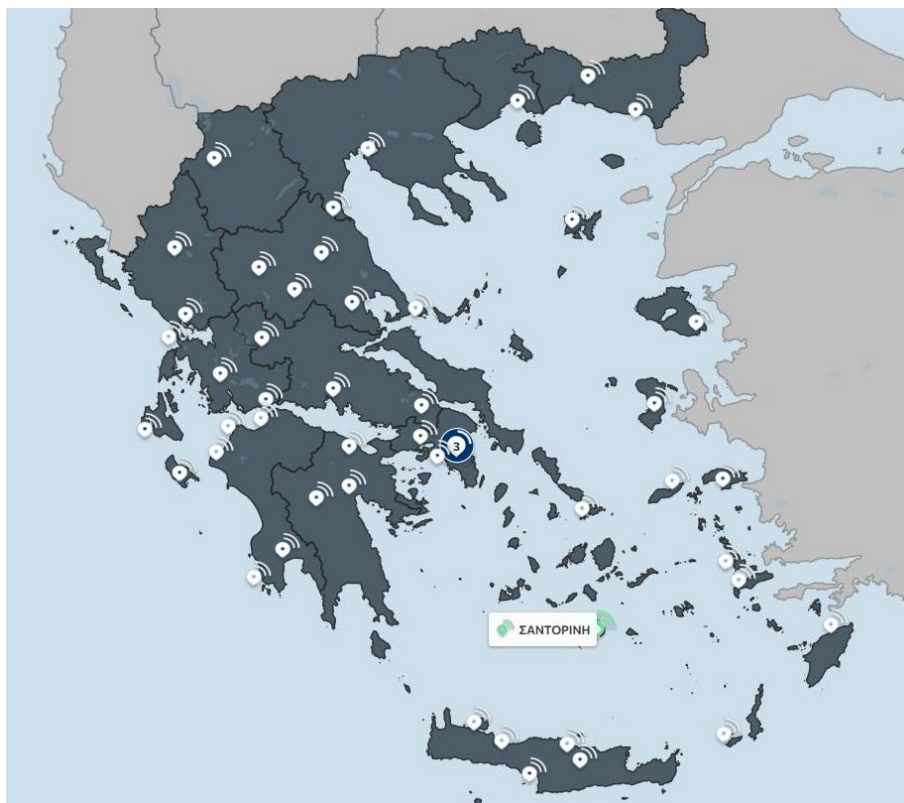
Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου = 11,67 m/s

Μέγιστη ταχύτητα ανέμου 42 m/s

Μέση ετήσια ηλιοφάνεια = 8,33 hrs

Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία = 1.826 kWh/m<sup>2</sup>

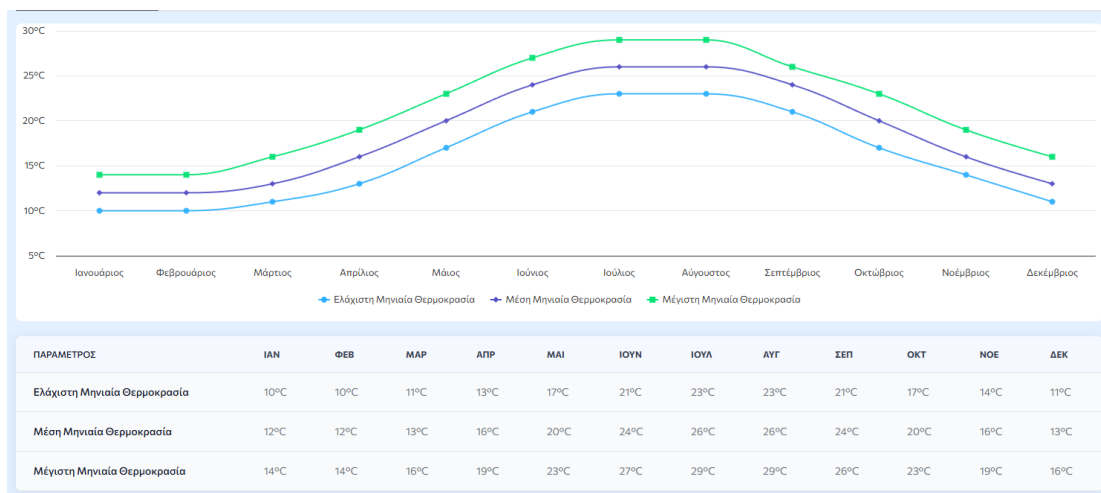
Ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/B = 1.643 Kwh/kWp



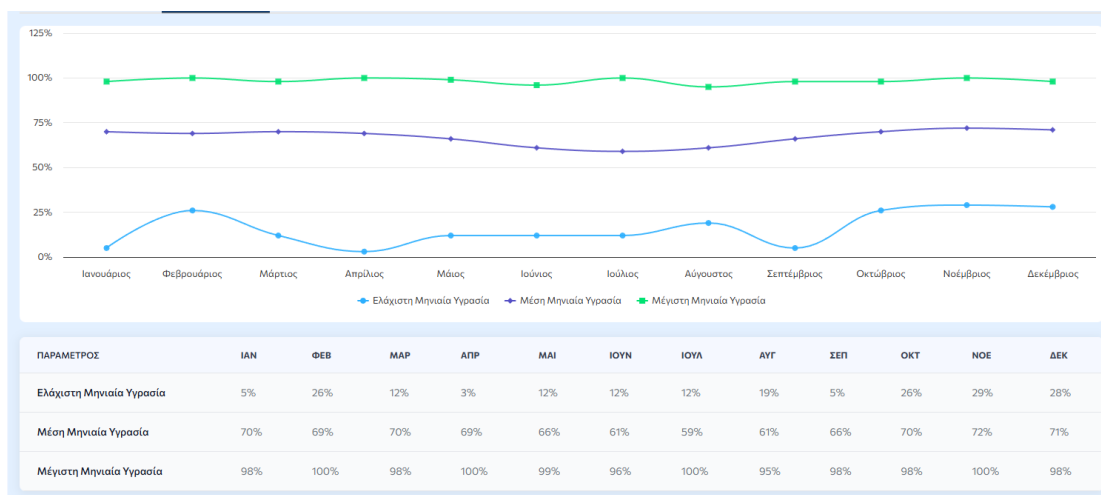
Εικόνα 33 Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 34 Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 35 Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY)).



Εικόνα 36 Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: ΕΜΥ)



Εικόνα 37 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: ΕΜΥ)

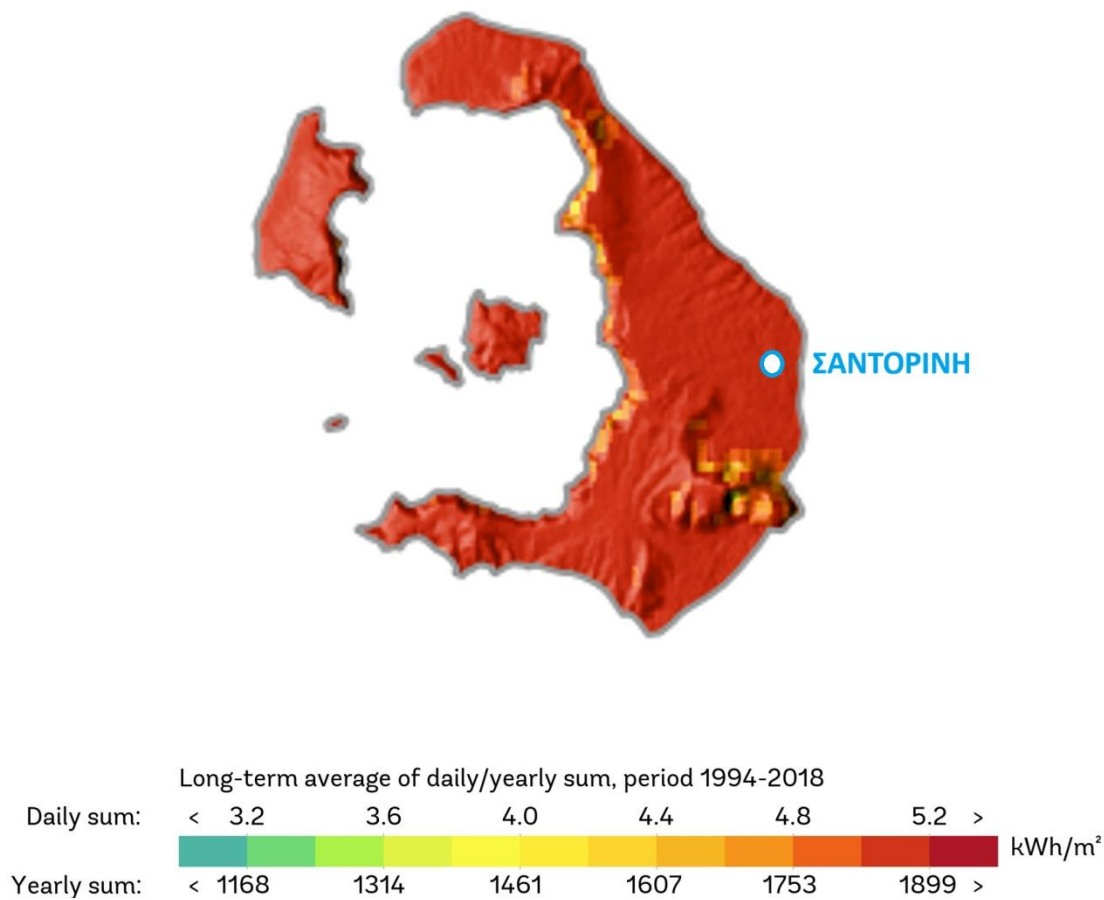


Εικόνα 38 Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: EMY)

| ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ |     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |                    |
|-------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ                                 | ΙΑΝ | ΦΕΒ | ΜΑΡ | ΑΠΡ | ΜΑΗ | ΙΟΥΝ | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ | ΣΕΠ | ΟΚΤ | ΝΟΕ | ΔΕΚ | ΕΤΗΣΙΩΣ            |
| Μέση μηνιαία θερμοκρασία (C°)             | 12  | 12  | 13  | 16  | 20  | 24   | 26   | 26  | 24  | 20  | 16  | 13  | 18,50 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία υγρασία (%)                  | 70  | 69  | 70  | 69  | 66  | 61   | 59   | 61  | 66  | 70  | 72  | 71  | 67,00 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)        | 13  | 13  | 12  | 11  | 10  | 11   | 13   | 12  | 11  | 11  | 11  | 12  | 11,67 Μέση τιμή    |
| Μέγιστη μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)     | 38  | 40  | 42  | 30  | 26  | 26   | 28   | 24  | 30  | 29  | 38  | 34  | 42,00 Μέγιστη τιμή |
| Μέση Μηνιαία Ηλιοφάνεια (hrs)             | 5   | 6   | 7   | 8   | 10  | 12   | 12   | 11  | 10  | 8   | 6   | 5   | 8,33 Μέση τιμή     |

Εικόνα 39 Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Σαντορίνης, με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα)

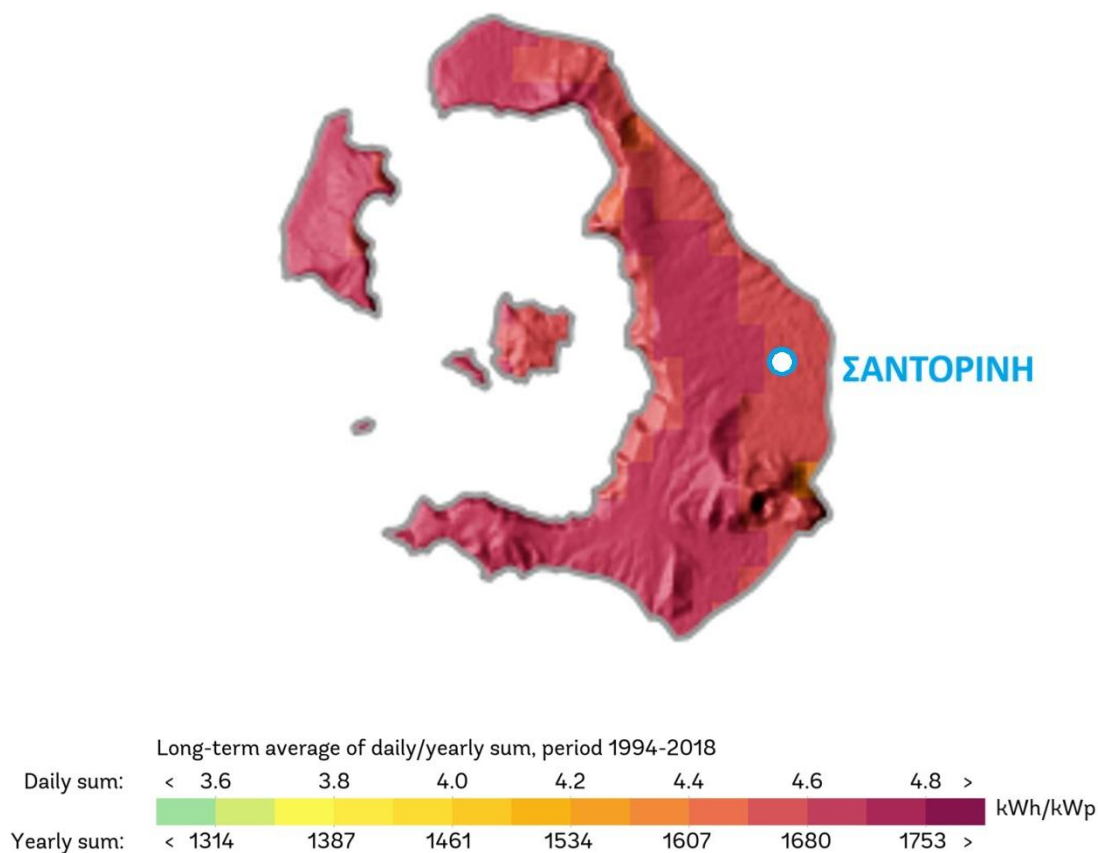
## ΧΑΡΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης, λαμβάνεται μέση ημερήσια οριζόντια ακτινοβολία 5,0 kWh/m<sup>2</sup> και ετήσια οριζόντια ακτινοβολία 1826 kWh/m<sup>2</sup>.

Εικόνα 40 Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από "Global Horizontal Irradiation – Greece", © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

## ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Σαντορίνης, λαμβάνεται μέσο ημερήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 4,5 kWh/ kWp και ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 1643 kWh/ kWp.

Εικόνα 41 Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Σαντορίνης. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από "Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece", © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

#### 6.4.4 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στη θέση Ηράκλειο προέρχονται από περιβαλλοντικό αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες WGS 84 (35.33519 , 25.18204) και σε υψόμετρο 39.13 μ.

Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται στο χώρο του αεροδρομίου Ηρακλείου.

Με βάση την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα στατιστικά στοιχεία της EMY και τους χάρτες ηλιακών πόρων © 2021 Solargis τα μετεωρολογικά δεδομένα της θέσης έχουν ως εξής:

Μέση ετήσια θερμοκρασία = 19,08 °C

Μέση ετήσια υγρασία = 64,50 %

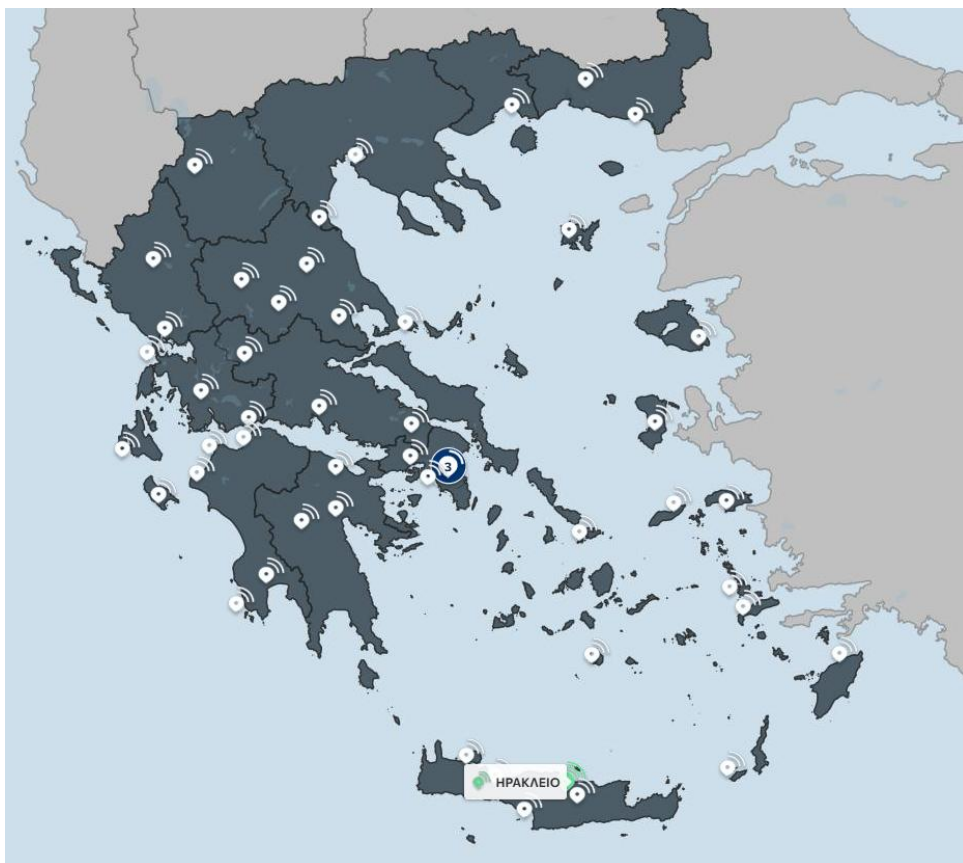
Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου = 9,00 m/s

Μέγιστη ταχύτητα ανέμου 41 m/s

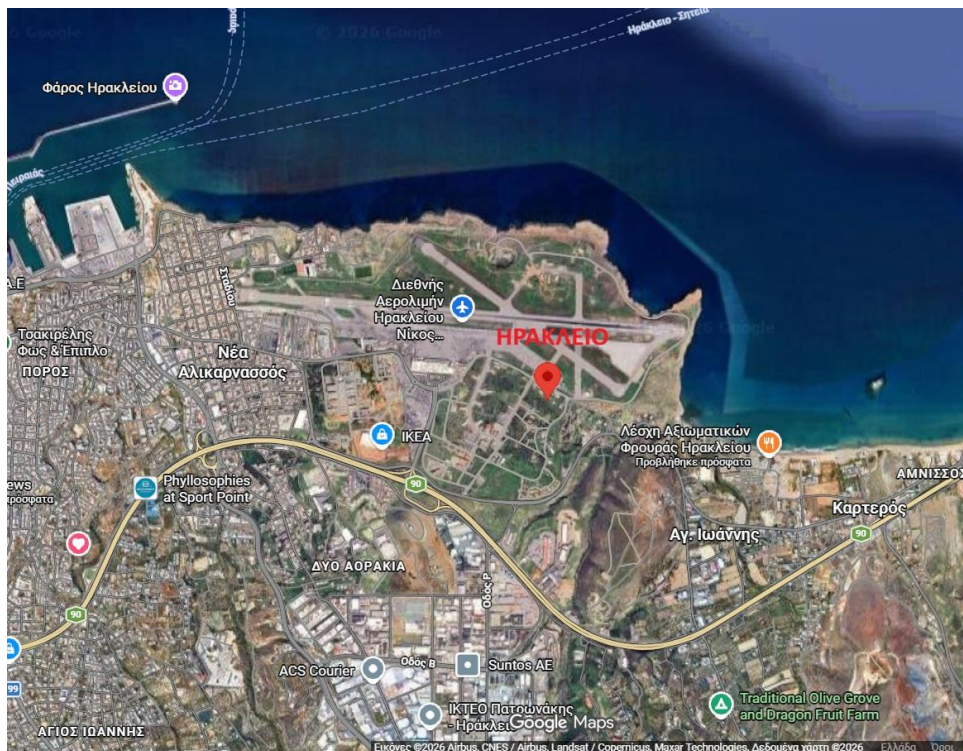
Μέση ετήσια ηλιοφάνεια = 8,00 hrs

Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία = 1.826 kWh/m<sup>2</sup>

Ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/B = 1.607 Kwh/kWp



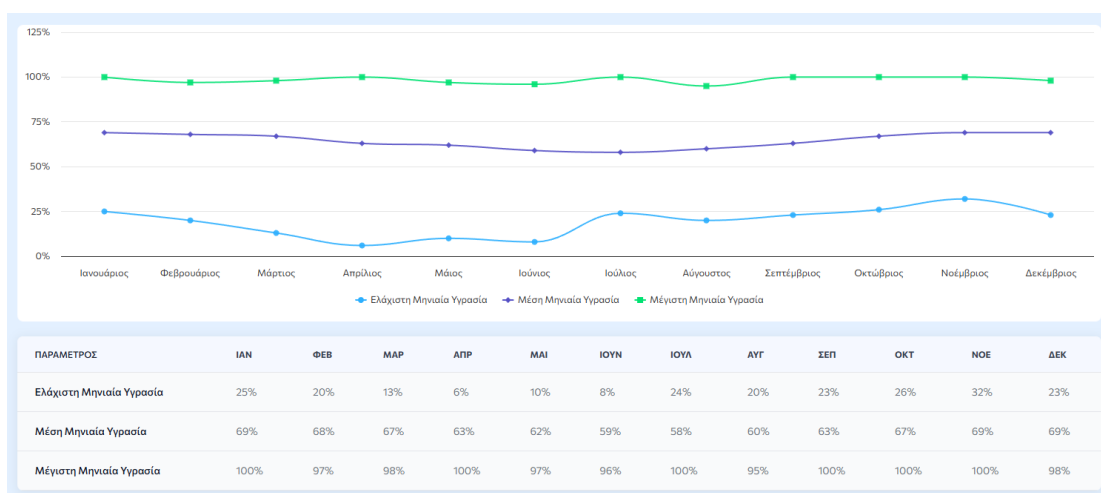
Εικόνα 42 Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 43 Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 44. Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY)).



Εικόνα 45. Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: ΕΜΥ)



Εικόνα 46. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: ΕΜΥ)

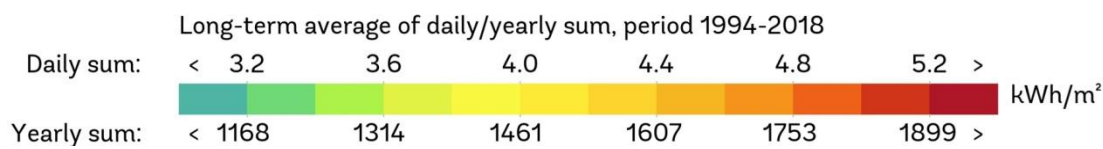


Εικόνα 47. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: EMY)

| ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ |     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |                    |
|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| ΗΡΑΚΛΕΙΟ                                 | ΙΑΝ | ΦΕΒ | ΜΑΡ | ΑΠΡ | ΜΑΗ | ΙΟΥΝ | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ | ΣΕΠ | ΟΚΤ | ΝΟΕ | ΔΕΚ | ΕΤΗΣΙΩΣ            |
| Μέση μηνιαία θερμοκρασία (C°)            | 12  | 12  | 14  | 17  | 21  | 25   | 27   | 26  | 24  | 20  | 17  | 14  | 19,08 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία υγρασία (%)                 | 69  | 68  | 67  | 63  | 62  | 59   | 58   | 60  | 63  | 67  | 69  | 69  | 64,50 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)       | 10  | 10  | 10  | 8   | 7   | 8    | 10   | 10  | 8   | 8   | 9   | 10  | 9,00 Μέση τιμή     |
| Μέγιστη μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)    | 39  | 40  | 41  | 33  | 29  | 23   | 24   | 24  | 25  | 35  | 32  | 36  | 41,00 Μέγιστη τιμή |
| Μέση Μηνιαία Ηλιοφάνεια (hrs)            | 4   | 5   | 7   | 8   | 10  | 12   | 13   | 12  | 9   | 7   | 5   | 4   | 8,00 Μέση τιμή     |

Εικόνα 48. Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Ηρακλείου, με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα)

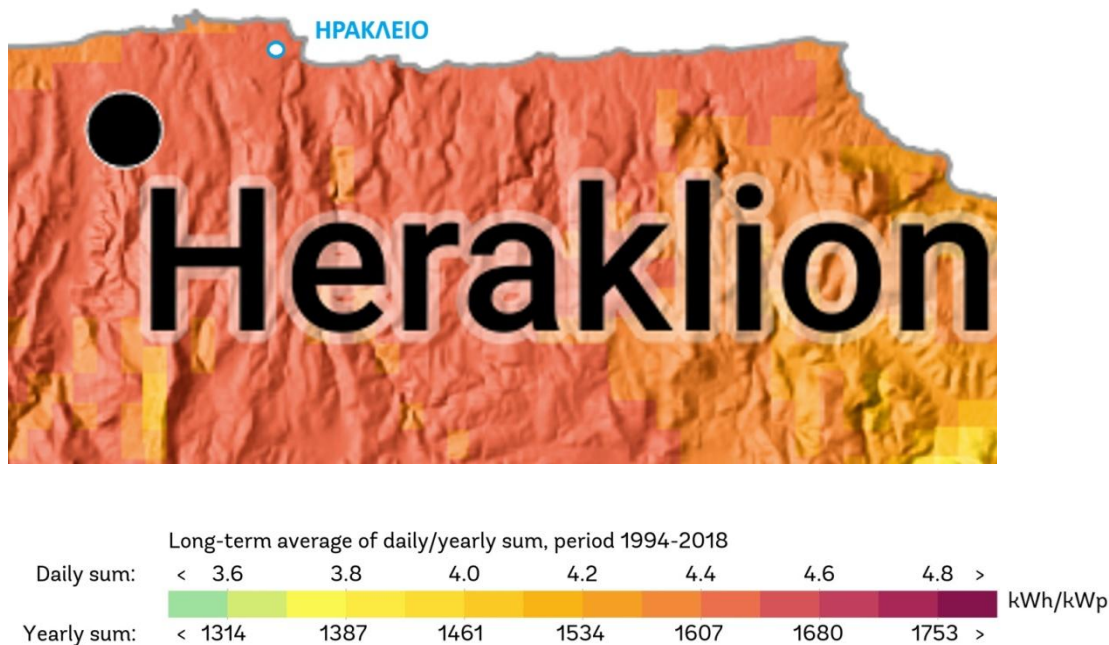
## ΧΑΡΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



Εικόνα 49. Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου, λαμβάνεται μέση ημερήσια οριζόντια ακτινοβολία 5,0 kWh/m<sup>2</sup> και ετήσια οριζόντια ακτινοβολία 1826 kWh/m<sup>2</sup>.

## ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 50. Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Ηρακλείου. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Ηρακλείου, λαμβάνεται μέσο ημερήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 4,4 kWh/ kWp και ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 1607 kWh/ kWp .

#### 6.4.5 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στη θέση Λάρισα προέρχονται από περιβαλλοντικό αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες WGS 84 (39.64598 , 22.46015) και σε υψόμετρο 70,00.

Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται στο χώρο του αεροδρομίου Λάρισα. Η περιοχή είναι επίπεδη εντός του Θεσσαλικού Κάμπου

Με βάση την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα στατιστικά στοιχεία της EMY και τους χάρτες ηλιακών πόρων © 2021 Solargis τα μετεωρολογικά δεδομένα της θέσης έχουν ως εξής:

Μέση ετήσια θερμοκρασία = 16,17°C

Μέση ετήσια υγρασία = 65,92 %

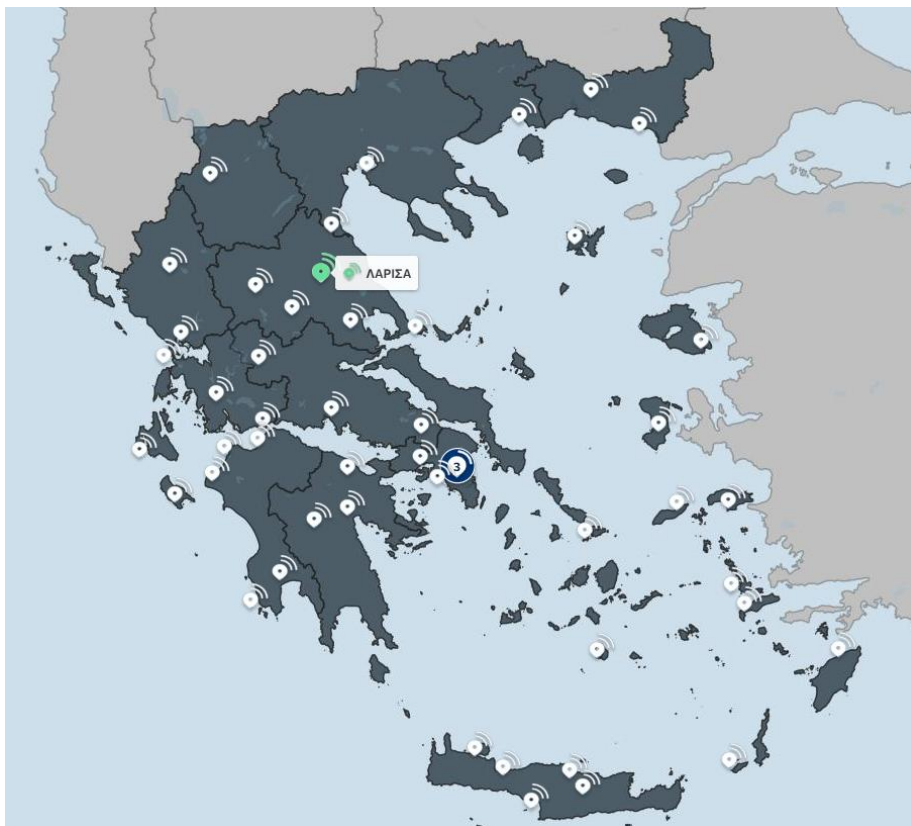
Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου = 3,58 m/s

Μέγιστη ταχύτητα ανέμου 30 m/s

Μέση ετήσια ηλιοφάνεια = 6,75 hrs

Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία = 1.498 kWh/m<sup>2</sup>

Ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/B = 1.461 Kwh/kWp



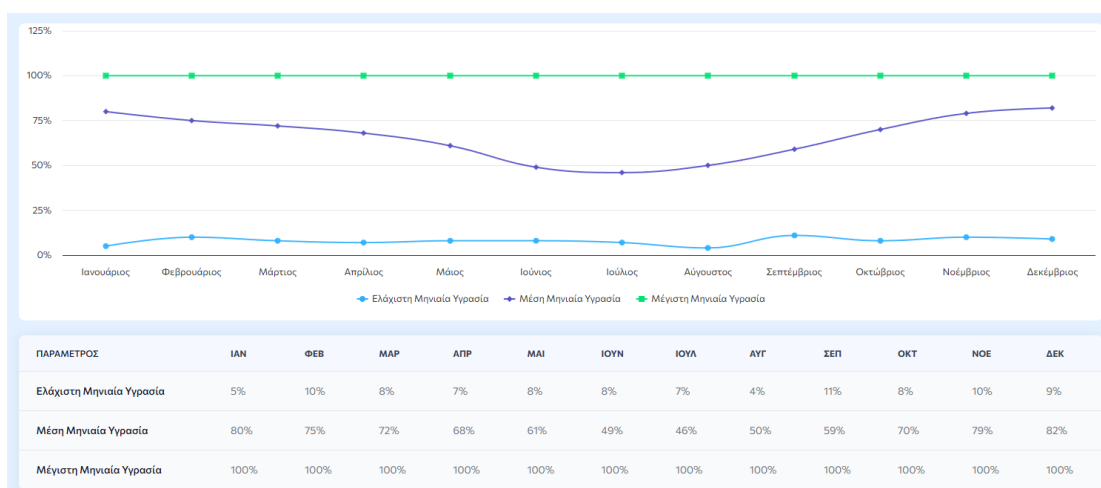
Εικόνα 51. Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Λάρισας. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 52. Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <https://www.google.com/maps>)



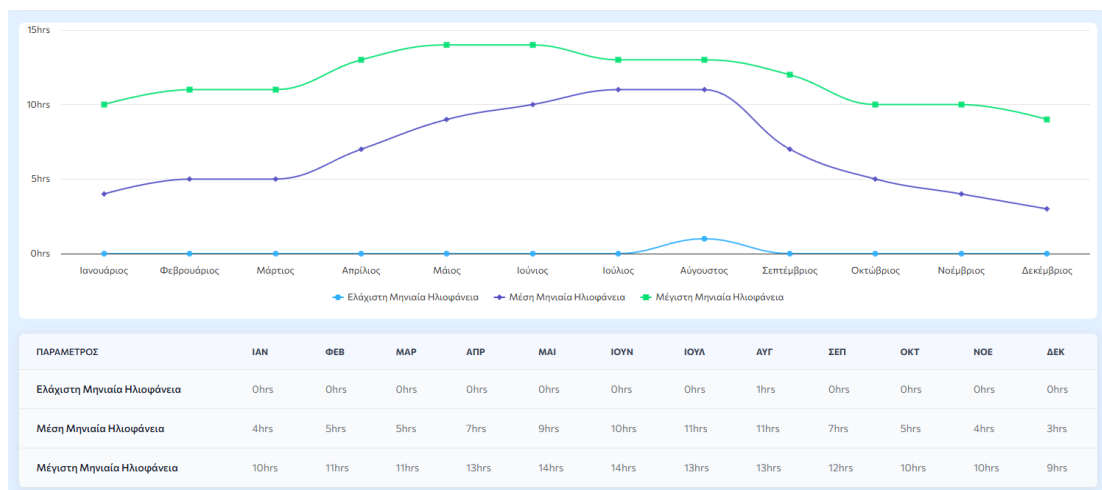
Εικόνα 53. Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY)).



Εικόνα 54. Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 55. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας (Πηγή: EMY)

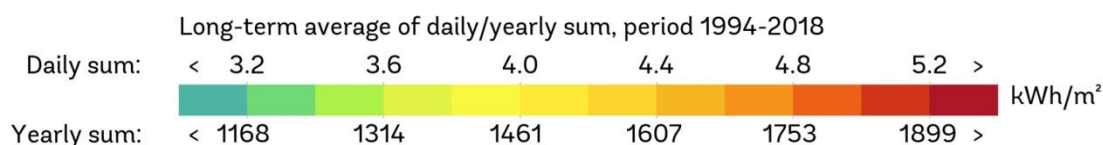


Εικόνα 56. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας (Πηγή: EMY)

| ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΑΘΜΟΥ ΛΑΡΙΣΑΣ |     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |                    |
|----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| ΛΑΡΙΣΑ                                 | ΙΑΝ | ΦΕΒ | ΜΑΡ | ΑΠΡ | ΜΑΗ | ΙΟΥΝ | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ | ΣΕΠ | ΟΚΤ | ΝΟΕ | ΔΕΚ | ΕΤΗΣΙΩΣ            |
| Μέση μηνιαία θερμοκρασία (C°)          | 5   | 7   | 10  | 14  | 20  | 26   | 28   | 27  | 22  | 17  | 11  | 7   | 16,17 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία υγρασία (%)               | 80  | 75  | 72  | 68  | 61  | 49   | 46   | 50  | 59  | 70  | 79  | 82  | 65,92 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)     | 2   | 4   | 4   | 4   | 4   | 5    | 5    | 4   | 4   | 3   | 2   | 2   | 3,58 Μέση τιμή     |
| Μέγιστη μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)  | 27  | 30  | 27  | 23  | 21  | 20   | 20   | 18  | 18  | 19  | 22  | 25  | 30,00 Μέγιστη τιμή |
| Μέση Μηνιαία Ηλιοφάνεια (hrs)          | 4   | 5   | 5   | 7   | 9   | 10   | 11   | 11  | 7   | 5   | 4   | 3   | 6,75 Μέση τιμή     |

Εικόνα 57. Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Λάρισας, με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα)

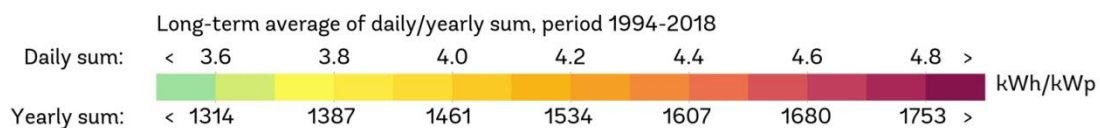
## ΧΑΡΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



Εικόνα 58. Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας, λαμβάνεται μέση ημερήσια οριζόντια ακτινοβολία 4,4 kWh/m<sup>2</sup> και ετήσια οριζόντια ακτινοβολία 1607 kWh/m<sup>2</sup>.

## ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 59. Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Λάρισας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Λάρισας, λαμβάνεται μέσο ημερήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 4,0 kWh/ kWp και ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 1461 kWh/ kWp .

#### 6.4.6 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στη θέση Καλαμάτα προέρχονται από περιβαλλοντικό αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες WGS 84 (Με βάση την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα στατιστικά στοιχεία της ΕΜΥ και τους χάρτες ηλιακών πόρων © 2021 Solargis τα μετεωρολογικά δεδομένα της θέσης έχουν ως εξής:

Μέση ετήσια θερμοκρασία =  $17^{\circ}\text{C}$

Μέση ετήσια υγρασία = 68,58 %

Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου = 5,08 m/s

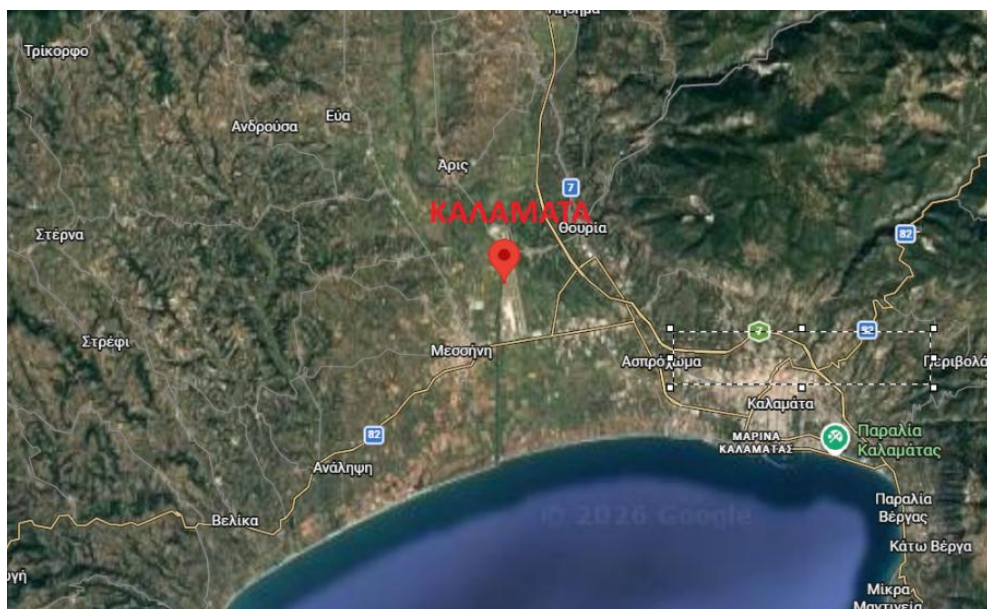
Μέση ετήσια ηλιοφάνεια = 8 hrs

Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία =  $1.753 \text{ kWh/m}^2$

Ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/Β = 1.571 Kwh/kWp



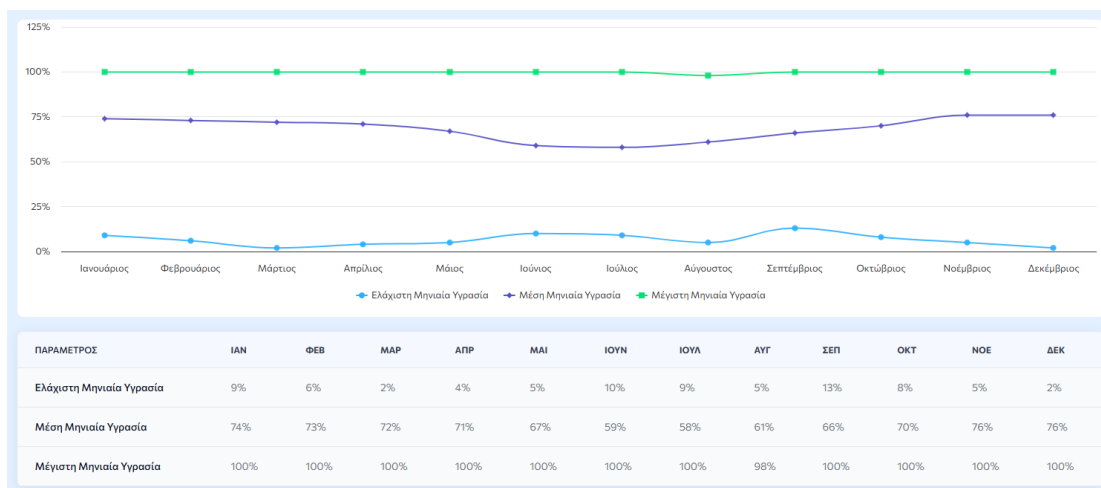
Εικόνα 60. Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: ΕΜΥ)



Εικόνα 61. Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <https://www.google.com/maps>)



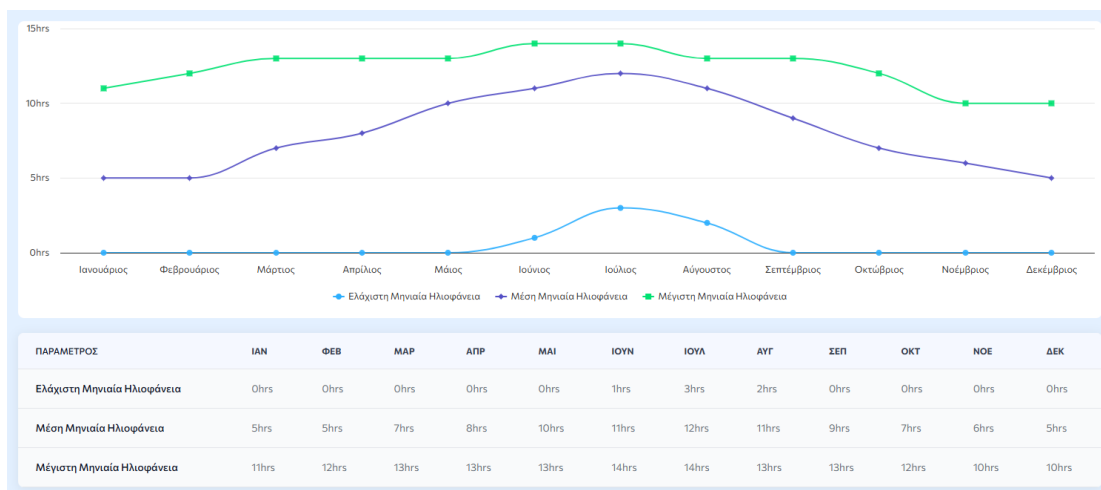
Εικόνα 62. Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY)).



Εικόνα 63. Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 64. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας (Πηγή: EMY)

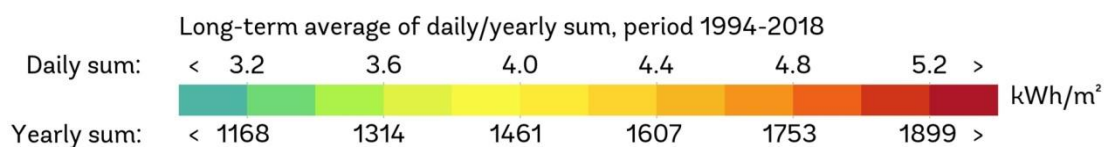


Εικόνα 65. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας (Πηγή: EMY)

| ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ |     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |         |              |
|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|---------|--------------|
| ΚΑΛΑΜΑΤΑ                                 | ΙΑΝ | ΦΕΒ | ΜΑΡ | ΑΠΡ | ΜΑΗ | ΙΟΥΝ | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ | ΣΕΠ | ΟΚΤ | ΝΟΕ | ΔΕΚ | ΕΤΗΣΙΩΣ |              |
| Μέση μηνιαία θερμοκρασία (C°)            | 10  | 11  | 12  | 15  | 20  | 16   | 24   | 27  | 23  | 19  | 15  | 12  | 17,00   | Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία υγρασία (%)                 | 74  | 73  | 72  | 71  | 67  | 59   | 58   | 61  | 66  | 70  | 76  | 76  | 68,58   | Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)       | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   | 6    | 6    | 6   | 5   | 4   | 4   | 5   | 5,08    | Μέση τιμή    |
| Μέγιστη μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)    | 32  | 39  | 29  | 20  | 20  | 22   | 19   | 27  | 19  | 24  | 28  | 31  | 39,00   | Μέγιστη τιμή |
| Μέση Μηνιαία Ηλιοφάνεια (hrs)            | 5   | 5   | 7   | 8   | 10  | 11   | 12   | 11  | 9   | 7   | 6   | 5   | 8,00    | Μέση τιμή    |

Εικόνα 66. Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Καλαμάτας, με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα)

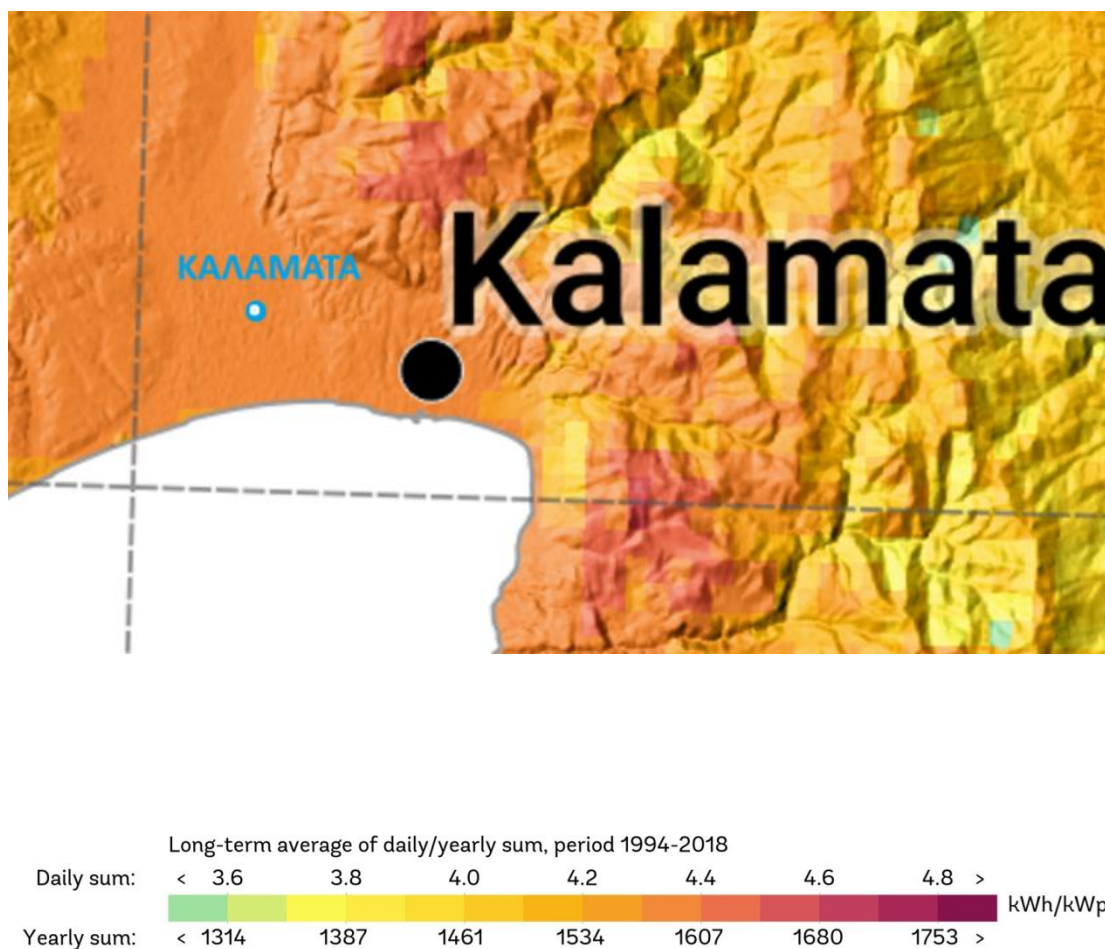
## ΧΑΡΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



Εικόνα 67. Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας, λαμβάνεται μέση ημερήσια οριζόντια ακτινοβολία  $4,8 \text{ kWh/m}^2$  και ετήσια οριζόντια ακτινοβολία  $1753 \text{ kWh/m}^2$ .

## ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 68. Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Καλαμάτας. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας, λαμβάνεται μέσο ημερήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 4,3 kWh/ kWp και ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 1571 kWh/ kWp .

#### 6.4.7 Δεδομένα στη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στη θέση Καστοριά προέρχονται από περιβαλλοντικό αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στη θέση με συντεταγμένες WGS 84 (40.44873, 21.27369) και σε υψόμετρο 657.

Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται στο χώρο του αεροδρομίου Καστοριάς.

Με βάση την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα στατιστικά στοιχεία της EMY και τους χάρτες ηλιακών πόρων © 2021 Solargis τα μετεωρολογικά δεδομένα της θέσης έχουν ως εξής:

Μέση ετήσια θερμοκρασία =  $13^{\circ}\text{C}$

Μέση ετήσια υγρασία = 66,67 %

Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου = 3,5 m/s

Μέγιστη ταχύτητα ανέμου 25 m/s

Μέση ετήσια ηλιοφάνεια = 7 hrs

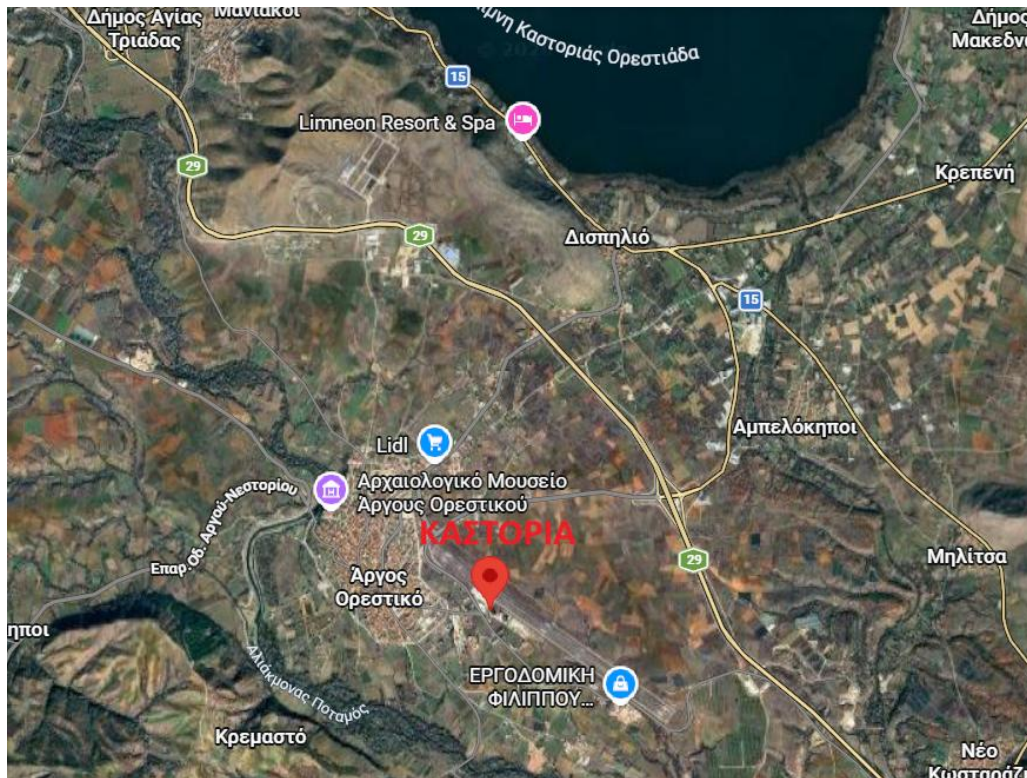
Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία =  $1.534 \text{ kWh/m}^2$

Ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/B = 1.461 Kwh/kWp

Μέγιστη ταχύτητα ανέμου 25 m/s



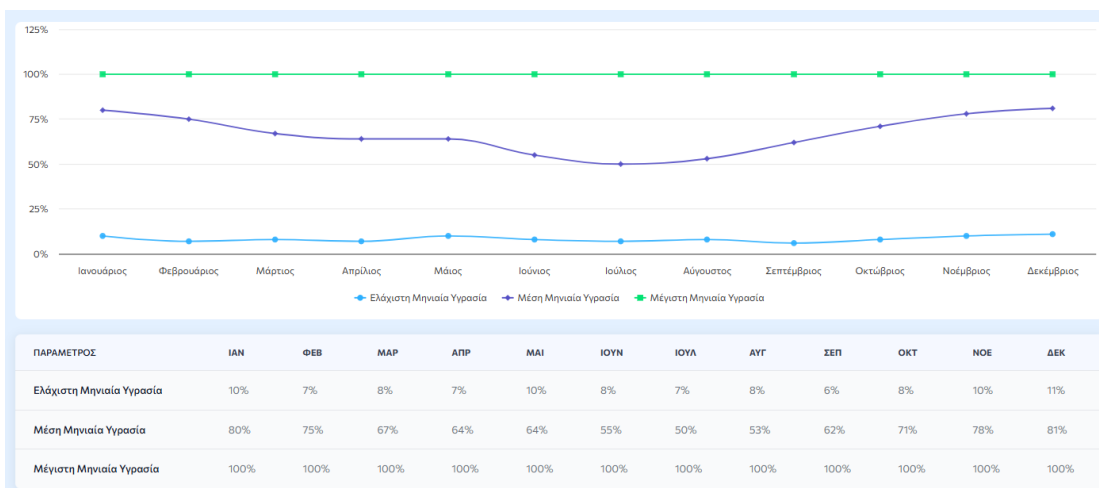
Εικόνα 69. Χάρτης μετεωρολογικών σταθμών της Ελλάδας, με ένδειξη του σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: EMY)



Εικόνα 70. Απόσπασμα χάρτη Google Earth με ένδειξη της θέσης του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από Google Maps της Google, <https://www.google.com/maps>)



Εικόνα 71. Ετήσια στατιστικά δεδομένα θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY)).



Εικόνα 72. Ετήσια στατιστικά δεδομένα υγρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: ΕΜΥ)



Εικόνα 73. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς (Πηγή: ΕΜΥ)

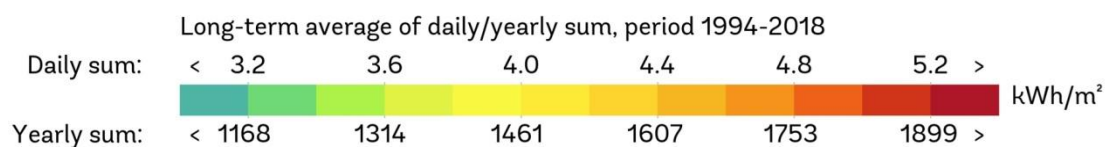


Εικόνα 74. Ετήσια στατιστικά δεδομένα ηλιοφάνειας του μετεωρολογικού σταθμού Καστοριάς (Πηγή: EMY)

| ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ |     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |                    |
|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| ΚΑΣΤΟΡΙΑ                                 | ΙΑΝ | ΦΕΒ | ΜΑΡ | ΑΠΡ | ΜΑΗ | ΙΟΥΝ | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ | ΣΕΠ | ΟΚΤ | ΝΟΕ | ΔΕΚ | ΕΤΗΣΙΩΣ            |
| Μέση μηνιαία θερμοκρασία (C°)            | 2   | 4   | 7   | 12  | 17  | 22   | 24   | 24  | 19  | 13  | 8   | 4   | 13,00 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία υγρασία (%)                 | 80  | 75  | 67  | 64  | 64  | 55   | 50   | 53  | 62  | 71  | 78  | 81  | 66,67 Μέση τιμή    |
| Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)       | 3   | 4   | 4   | 4   | 4   | 4    | 4    | 4   | 3   | 3   | 2   | 3   | 3,50 Μέση τιμή     |
| Μέγιστη μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)    | 25  | 18  | 18  | 18  | 19  | 17   | 16   | 16  | 13  | 17  | 16  | 24  | 25,00 Μέγιστη τιμή |
| Μέση Μηνιαία Ηλιοφάνεια (hrs)            | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9    | 11   | 10  | 8   | 6   | 4   | 6   | 7,00 Μέση τιμή     |

Εικόνα 75. Τιμές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, από τον μετεωρολογικό σταθμό Καλαμάτας, με καταγραφή της ετήσιας εξέλιξης των μεγεθών και υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής. (Πηγή: EMY, επεξεργασία δεδομένων από τον συγγραφέα)

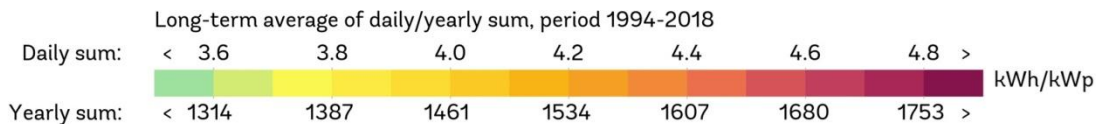
## ΧΑΡΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ



Εικόνα 76. Απόσπασμα χάρτη παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Καστοριά. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Global Horizontal Irradiation – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας, λαμβάνεται μέση ημερήσια οριζόντια ακτινοβολία  $4,2 \text{ kWh/m}^2$  και ετήσια οριζόντια ακτινοβολία  $1534 \text{ kWh/m}^2$ .

## ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 77. Απόσπασμα χάρτη δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, με ένδειξη της θέσης του φωτοβολταϊκού σταθμού Καστοριάς. (Πηγή: Προσαρμοσμένο από “Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece”, © 2021 Solargis, <https://solargis.com>, άδεια CC BY-SA 4.0)

Για τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας, λαμβάνεται μέσο ημερήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 4,0 kWh/ kWp και ετήσιο δυναμικό παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 1461 kWh/ kWp .

## 6.5 Καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας

### 6.5.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Στη βιβλιογραφία, η ηλιακή ακτινοβολία είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη θετική επίδραση στην καταλληλότητα μιας θέσης για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών.

Το άρθρο των Karadöl & Yildirim (2025) εξετάζει την επίδραση αμιγώς μετεωρολογικών παραμέτρων στην καταλληλότητα μιας θέσης για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών και αποδίδει συντελεστή βαρύτητας στην ηλιακή ακτινοβολία ίσο με 50%.

Το άρθρο των Yilmaz et al. (2024) αναφέρει ότι η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης χαρακτηρίζεται ως ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η ποσότητα επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος, η θερμοκρασία του αέρα, η γωνία του ήλιου, η εξάτμιση και η υγρασία. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας θεμελιώδης παράγοντας για τον προσδιορισμό της παραγωγής των φωτοβολταϊκών σταθμών, καθιστώντας την βασική απαίτηση για την παραγωγή ενέργειας. Συνεπώς, αυτό το κριτήριο έχει σημαντική σημασία για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας των φωτοβολταϊκών. Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι εν λόγω παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (26,10%), τη μέση ετήσια νέφωση (18,42%), τη μέση ετήσια υγρασία (με βαρύτητα 18,42%), τη μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα (12,12%). Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση, η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $26,10\% + 18,42\% + 18,42\% + 12,12\% = 74,97\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $26,01\% / 74,97\% = 34,69\%$ .

Το άρθρο των Farnaz et al. (2025) αναφέρει ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι η πιο σημαντική παράμετρος για την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα και οι περιοχές με άφθονη ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο ευνοϊκές για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Στα πλαίσια της μελέτης οι τιμές ηλιακής ακτινοβολίας των εξεταζόμενων περιοχών κατηγοριοποιήθηκαν σε δυο ομάδες. Τιμές ακτινοβολίας χαμηλότερες από 1197 W/m<sup>2</sup> αναγνωρίστηκαν ως μη κατάλληλες περιοχές, καθώς παρέχουν ανεπαρκή ενέργεια για αποτελεσματική λειτουργία φωτοβολταϊκών, ενώ τιμές ακτινοβολίας μεταξύ 1197 W/m<sup>2</sup> και 1796 W/m<sup>2</sup> κατατάχθηκαν ως κατάλληλες περιοχές λόγω του υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας που διαθέτουν. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης οι μετεωρολογικές παράμετροι που ελέγχθηκαν είναι η ηλιακή ακτινοβολία με βαρύτητα 25% και η

θερμοκρασία με βαρύτητα 20%. Συνεπώς η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων στη συγκεκριμένη μελέτη είναι  $25\% + 20\% = 45\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $25\%/45\% = 55,56\%$

Το άρθρο των Al Awadhi et all. (2025) αναφέρει ότι το κριτήριο της ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητο για τον εντοπισμό κατάλληλων τοποθεσιών ηλιακών πάρκων. Η έρευνα δείχνει ότι οι περιοχές με υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία έχουν μεγαλύτερο δυναμικό παραγωγής ενέργειας. Οι τοποθεσίες που δέχονται ετήσια οριζόντια ακτινοβολία (GHI) μικρότερη από  $1300 \text{ kW/m}^2$  συνήθως εξαιρούνται από την εξέταση]. Είναι επίσης σημαντικό να επιλέγονται περιοχές χωρίς πηγές σκιάς. Επιπλέον, υπάρχει σημαντική σχέση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και της κάλυψης νεφών, καθώς οι περιοχές με ερισσότερα σύννεφα είναι λιγότερο κατάλληλες λόγω μειωμένης έκθεσης στο ηλιακό φως. Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (22,80 %) , την ταχύτητα του ανέμου (5,70%) , οι βροχοπτώσεις ( 4,6%), η υγρασία ( 4,6%) και η Θερμοκρασία (2,8%) . Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση , η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $22,80\% + 5,70\% + 4,60\% + 4,60\% = 40,50\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $22,80\% / 40,50\% = 56,30\%$ .

Στο άρθρο των Zambrano et all. (2021) λαμβάνονται υπόψη οι μετεωρολογικές παράμετροι της ηλιακής ακτινοβολίας με βαρύτητα 39,30 % και της θερμοκρασίας με βαρύτητα 4,60%. Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων σε σχέση με το σύνολο των παραμέτρων είναι ίση με  $39,30\% + 4,60\% = 43,90\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $39,30\% / 43,90\% = 89,52\%$ .

Στο άρθρο του Gökler (2025) αξιολογούνται οι μετεωρολογικές παράμετροι της ηλιακής ακτινοβολίας με βαρύτητα 38,40 % και της ταχύτητας του ανέμου με βαρύτητα 8,30%. Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων σε σχέση με το σύνολο των παραμέτρων είναι ίση με  $38,40\% + 8,30\% = 46,70\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $38,40\% / 46,70\% = 82,23\%$ .

Στο άρθρο των Çolak et al. (2020) αναφέρεται ότι κατά την επιλογή της τοποθεσίας για ηλιακούς φωτοβολταϊκούς σταθμούς, αναλύεται πρώτα το ηλιακό δυναμικό της περιοχής όπου θα διεξαχθεί η παρούσα μελέτη. Η εγκατάσταση ενός τέτοιου σταθμού παραγωγής ενέργειας σε περιοχές με χαμηλό ηλιακό δυναμικό έρχεται σε αντίθεση με την αποδοτικότητα και το κόστος. Επομένως, πρέπει να προσδιοριστεί η κατάσταση του ηλιακού δυναμικού της περιοχής που πρόκειται να μελετηθεί. Η επιλογή περιοχών με υψηλή διάρκεια ηλιοφάνειας κατά τον προσδιορισμό των θέσεων των ηλιακών φωτοβολταϊκών σταθμών συμβάλλει σημαντικά στην επιθυμητή απόδοση. Στη συγκεκριμένη μελέτη η μοναδική μετεωρολογική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη είναι η ηλιακή ακτινοβολία με βαρύτητα 21,84% .

Στο άρθρο των Hooshangi, et al. (2023) αξιολογούνται οι μετεωρολογικές παράμετροι της θερμοκρασίας με βαρύτητα 11,60%, της ηλιοφάνειας με βαρύτητα 5,60% , των βροχοπτώσεων με βαρύτητα 1,10% και της ηλιακής ακτινοβολίας με βαρύτητα 18,90%. Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων σε σχέση με το σύνολο των παραμέτρων είναι ίση με  $11,60\% + 5,60\% + 1,10\% + 18,90\% = 36,70\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $18,90\% / 36,70\% = 51,50\%$  .

Στο άρθρο των Elboshy et al. (2022) αξιολογούνται οι μετεωρολογικές παράμετροι της θερμοκρασίας με βαρύτητα 14,90%, νέφωσης με βαρύτητα 10,80 % και της ηλιακής ακτινοβολίας με βαρύτητα 27,00 % . Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων σε σχέση με το σύνολο των παραμέτρων είναι ίση με  $27\% + 14,90\% + 10,80\% = 52,70\%$  % και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $27\% / 52,70\% = 51,23\%$  %.

### **Σχολιασμός βιβλιογραφικών αναφορών**

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε , διαπιστώθηκε ότι όλες οι μελέτες αποδίδουν δεσπόζουσα σημασία της ηλιακή ακτινοβολία των εξεταζόμενων περιοχών. Υπάρχουν αποκλίσεις στη βαρύτητα που αποδίδεται στη συγκεκριμένη παράμετρο αλλά η κυρίαρχη τάση αντιστοιχεί σε μία βαρύτητα της τάξης του 50%. . Συγκεντρωτικά οι τιμές βαρύτητας που καταγράφηκαν είναι (21,84% , 34,69% , 50,00% , 51,23% , 51,50% , 55,56%, 56,30 % , 82,23% , 89,52%)

### 6.5.2 Θερμοκρασία

Στο άρθρο των Karadöl & Yildirim (2025) αναφέρεται ότι συνθήκες που μπορούν να επηρεάσουν θετικά την παραγωγή ενέργειας όπως η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία συγκρίνονται με συνθήκες που έχουν αρνητική επίδραση όπως ο άνεμος, η υγρασία και η νεφοκάλυψη. Στη συγκεκριμένη μελέτη η οποία εξετάζει αποκλειστικά μετεωρολογικές παραμέτρους, αποδίδεται στη θερμοκρασία βαρύτητα ίση με 12%.

Στο άρθρο των Yilmaz et al. (2024) αναφέρεται ότι η θερμοκρασία του αέρα ασκεί σημαντική επίδραση στην απόδοση των ΑΠΕ καθώς και ότι η μείωση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα μιας περιοχής ευνοεί τη βελτίωση της απόδοσης των ΑΠΕ. Επισημαίνεται ότι είναι γνωστό ως γεγονός ότι οι υψηλές θερμοκρασίες του αέρα μπορούν να έχουν αρνητική επίδραση στην απόδοση των ΑΠΕ, ιδιαίτερα σε εξαρτήματα όπως οι μετατροπείς και οι μετασχηματιστές. Επισημαίνεται ότι μπορεί να επαληθευτεί με εμπειρικά στοιχεία ότι οι ΑΠΕ αποδίδουν πιο αποτελεσματικά σε θερμοκρασίες αέρα κάτω των 25 °C. Ωστόσο, σε υψηλότερες θερμοκρασίες αέρα, μια αύξηση 1 °C μπορεί να προκαλέσει μείωση της ισχύος εξόδου κατά 0,4%–0,5%. Συνεπώς, είναι ύψιστης σημασίας να προσδιοριστεί σχολαστικά το βέλτιστο εύρος θερμοκρασίας αέρα για την ενίσχυση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάρκων. Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (26,10 %) , τη μέση ετήσια νεφοκάλυψη (18,42%) , τη μέση ετήσια πυκνότητα υδρατμών (18,42%) και τη μέση ετήσια θερμοκρασία (12,12%). Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $26,10\% + 18,42\% + 18,42\% + 12,12\% = 74,97\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $12,12\% / 74,97\% = 16,17\%$ .

Στο άρθρο των Farnaz et al. (2025) μία από τις εξεταζόμενες παραμέτρους είναι η θερμοκρασία η οποία όμως εξετάζεται ως θερμοκρασία επιφάνειας της γης (Land Surface Temperature) και όχι θερμοκρασία του αέρα. Στο συγκεκριμένο άρθρο αναφέρεται ότι οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να μειώσουν την απόδοση των ηλιακών πάνελ, ενώ οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε μη βέλτιστη παραγωγή ενέργειας. Με βάση αυτή την κατανόηση, περιοχές με τιμές LST μεταξύ 4,5 °C και 5,3 °C ταξινομήθηκαν ως κατάλληλες, καθώς αυτές οι θερμοκρασίες είναι βέλτιστες για την παραγωγή ενέργειας. Τιμές εκτός αυτού του εύρους κρίθηκαν ακατάλληλες επειδή είτε υπερβαίνουν την ιδανική θερμοκρασία για την απόδοση των φωτοβολταϊκών είτε πέφτουν κάτω από το όριο για αποτελεσματική παραγωγή ενέργειας. Γίνεται πάντως κατανοητό και στο συγκεκριμένο

άρθρο ότι η επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα είναι θετική εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών. Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (25,00 %) και θερμοκρασία (20,00 %). Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $25,00\% + 20,00\% = 45,00\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της θερμοκρασίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $20,00\% / 45,00\% = 44,44\%$ .

Στο άρθρο των Al Awadhi et al. (2025) , αναφέρεται ότι πολυάριθμες μελέτες έχουν υπογραμμίσει τη σημασία της θερμοκρασίας ως κρίσιμου παράγοντα στην επιλογή κατάλληλων τοποθεσιών για ηλιακά πάρκα, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση και τις χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες να την ενισχύουν . Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (22,80 %) , την ταχύτητα ανέμου (5,70%) , οι βροχοπτώσεις (4,6%), η υγρασία (4,60%) και θερμοκρασία (2,80 %). Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $22,80\% + 5,70\% + 4,60\% + 4,60\% + 2,80\% = 40,50\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της θερμοκρασίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $2,80\% / 40,50\% = 6,91\%$ .

Στη μελέτη των Zambrano-Asanza et al. (2021), η θερμοκρασία δεν αναφέρεται στη θερμοκρασία αέρα, αλλά στη θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους (Land Surface Temperature – LST), η οποία προκύπτει από δορυφορικά θερμικά δεδομένα. Η LST χρησιμοποιείται ως δείκτης της θερμικής καταπόνησης της επιφάνειας και των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Για τον λόγο αυτό, περιοχές με υψηλές τιμές LST (23–27 °C) χαρακτηρίζονται ως λιγότερο κατάλληλες, ενώ περιοχές με χαμηλές τιμές LST αξιολογούνται ευνοϊκότερα. Το αποτέλεσμα αυτό δεν έρχεται σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία που βασίζεται στη θερμοκρασία αέρα, καθώς πρόκειται για διαφορετικά φυσικά μεγέθη με διαφορετική ερμηνεία ως προς τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (39,30 %) και τη μέση θερμοκρασία (4,60 %). Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $39,30\% + 4,60\% = 43,90\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της θερμοκρασίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $4,60\% / 43,90\% = 10,48\%$ .

Στη μελέτη των Hooshangi, et all. (2023) εξετάζονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (18,90 %) ,τη θερμοκρασία (11,60 %), την ηλιοφάνεια (5,60%) και την βροχόπτωση (1,10%) Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $18,90\% + 11,60\% + 5,60\% + 1,10\% = 36,70\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της θερμοκρασίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $30,25\% / 36,70\% = 10,48\%$ .

Στη μελέτη των Elboshy et all. (2022) εξετάζονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (27,00%) ,τη θερμοκρασία (14,90 %) και τη νέφωση (10,80%). Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $27,00\% + 14,90\% + 10,80\% = 52,70\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της θερμοκρασίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $14,90\% / 52,70\% = 28,27\%$ .

### Σχολιασμός Βιβλιογραφίας

Στην παρούσα μελέτη επειδή όλες οι περιοχές παρουσιάζουν μέση ετήσια θερμοκρασία μικρότερη των 25°C θεωρείται ότι η μεγαλύτερη μέση ετήσια θερμοκρασία αποτελεί θετική παράμετρο ως προς την αξιολόγηση των περιοχών. Σε σχέση με τη βαρύτητα που αποδίδεται στην παράμετρο της θερμοκρασίας διαπιστώνονται μεγάλες διαφορές στις προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας που εξετάστηκε. Συγκεντρωτικά οι τιμές βαρύτητας που καταγράφηκαν είναι (6,91% , 10,48% , 12,00% , 16,17 % , 28,27% , 30,25% , 44,44%)

### 6.5.3 Ηλιοφάνεια / Νεφοκάλυψη

Στη μελέτη των Karadöl & Yildirim (2025) εξετάζονται αποκλειστικά μετεωρολογικές παράμετροι. Η νέφωση καταγράφεται ως μία παράμετρος με αρνητική επίδραση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βαρύτητα 25%.

Στη μελέτη των Yilmaz et all. (2024) αναφέρεται ότι το ποσοστό των ημερών χωρίς ηλιοφάνεια που αποτελούν την ετήσια μέση συχνότητα νεφών ασκεί σημαντική επίδραση στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτό συμβαίνει επειδή όταν μεγαλώνει η νεφοκάλυψη, μειώνεται η ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά , επιδρώντας αρνητικά στην ενεργειακή παραγωγή. Ως εκ τούτου, οι περιοχές που εμφανίζουν αυξημένη συχνότητα νεφών θεωρούνται δυσμενείς για τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (26,10%) , τη μέση

ετήσια νέφωση (18,42%) , τη μέση ετήσια υγρασία (με βαρύτητα 18,42%) , τη μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα (12,12%) . Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση , η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $26,10\% + 18,42\% + 18,42\% + 12,12\% = 74,97\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της νεφοκάλυψης ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $18,42\% / 74,97\% = 24,57\%$ .

Στη μελέτη των Hooshangi, et all. (2023) εξετάζονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (18,90 %) ,τη θερμοκρασία (11,60 %), την ηλιοφάνεια (5,60%) και την βροχόπτωση (1,10%). Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $18,90\% + 11,60\% + 5,60\% + 1,10\% = 36,70\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ηλιοφάνειας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $5,60\% / 36,70\% = 15,26\%$ .

Στη μελέτη των Elboshy et all. (2022) εξετάζονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (27,00%) ,τη θερμοκρασία (14,90 %) και τη νέφωση (10,80%). Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $27,00\% + 14,90\% + 10,80\% = 52,70\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της νέφωσης ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $10,80\% / 52,70\% = 20,49\%$ .

### Σχολιασμός Βιβλιογραφίας

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε , διαπιστώνεται διαφοροποίηση των ερευνητών ως προς τη βαρύτητα που αποδίδουν στην επίδραση της νέφωσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα.

Η συγκεκριμένη παράμετρος όταν εκφράζεται ως ηλιοφάνεια λαμβάνεται υπόψη με θετική επίδραση ενώ όταν εκφράζεται ως νέφωση έχει αρνητική επίδραση. Συγκεντρωτικά οι τιμές βαρύτητας που καταγράφηκαν είναι (15,26% , 20,49% , 24,57% , 25,00%)

### 6.5.4 Άνεμος

Στη μελέτη των Karadöl & Yildirim (2025) εξετάζονται αποκλειστικά μετεωρολογικές παράμετροι. Ο άνεμος καταγράφεται ως μία παράμετρος με αρνητική επίδραση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βαρύτητα 8%.

Στη μελέτη των Al Awadhi et all. (2025) αναφέρεται ότι η ταχύτητα του ανέμου (μετρούμενη σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο) είναι επίσης κρίσιμη για τον προσδιορισμό κατάλληλων τοποθεσιών για ηλιακή ενέργεια.. Η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει την ψύξη των ηλιακών συλλεκτών, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητά τους. Επιπλέον, η

ταχύτητα του ανέμου είναι ευεργετική για την εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων ηλιακής-αιολικής ενέργειας. Περιοχές με ταχύτητες ανέμου που κυμαίνονται από 3 έως 4 m/s είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για πάρκα ηλιακής ενέργειας. Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (22,80 %) , την ταχύτητα του ανέμου (5,70%) , τις βροχοπτώσεις ( 4,6%), την υγρασία ( 4,6%) και τη Θερμοκρασία (2,8%) . Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση , η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $22,80\% + 5,70\% + 4,60\% + 4,60\% = 40,50\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ταχύτητας του ανέμου ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $5,70\% / 40,50\% = 14,07\%$ .

Στη μελέτη του Gökler (2025) επισημαίνεται η ότι επίδραση της ταχύτητας του ανέμου είναι σχετική καθώς απαιτείται μια ορισμένη ποσότητα ανέμου για να μειωθεί η θερμοκρασία των ηλιακών πάνελ αλλά υψηλής ταχύτητας άνεμοι έχουν αρνητική επίδραση στο σύστημα των panels.

Σχόλιο δικό μου - Από μηχανικής άποψης καθίσταται προφανές ότι υψηλής ταχύτητας άνεμοι ασκούν μεγαλύτερες πιέσεις στα panels αυξάνονται τις απαιτήσεις αντοχής όλων των τμημάτων του συστήματος στήριξης και συνεπώς του κόστους κατασκευής.

Στη συγκεκριμένη μελέτη αξιολογούνται οι μετεωρολογικές παράμετροι της ηλιακής ακτινοβολίας με βαρύτητα 38,40 % και της ταχύτητας του ανέμου με βαρύτητα 8,30%. Η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων σε σχέση με το σύνολο των παραμέτρων είναι ίση με  $38,40\% + 8,30\% = 46,70\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της ταχύτητας του ανέμου ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $8,30\% / 46,70\% = 17,77\%$ .

### Σχολιασμός Βιβλιογραφίας

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε , διαπιστώνεται διαφοροποίηση των ερευνητών ως προς τη βαρύτητα που αποδίδουν στην επίδραση του ανέμου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα.

Προκύπτει ακόμα το συμπέρασμα ότι για μικρές ταχύτητες ανέμου της τάξης των 3 έως 4 m/s η επίδραση του ανέμου είναι θετική. Για μεγαλύτερες όμως ταχύτητες η επίδραση είναι αρνητική. Συγκεντρωτικά οι τιμές βαρύτητας που καταγράφηκαν είναι (8% , 14,07% , 17,77%)

### 6.5.5 Υγρασία

Στη μελέτη των Karadöl & Yildirim (2025) εξετάζονται αποκλειστικά μετεωρολογικές παράμετροι. Η υγρασία καταγράφεται ως μία παράμετρος με αρνητική επίδραση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βαρύτητα 4%.

Στη μελέτη των Yilmaz et all. (2024) αναφέρεται ότι η παρουσία υδρατμών μπορεί να εμποδίσει τη μετάδοση του ηλιακού φωτός στο ηλιακό κύτταρο, με αποτέλεσμα τη μείωση του ηλεκτρικού ρεύματος, του συντελεστή φορτίου και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι τα ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου υφίστανται μείωση έως και 3% στην παραγωγή ενέργειας λόγω της επίδρασης των υδρατμών υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Υπό τις ίδιες συνθήκες, τα ηλιακά κύτταρα άμορφου πυριτίου παρουσίασαν απώλεια απόδοσης μικρότερη από 1%. Κατά συνέπεια, η συγκέντρωση υδρατμών έχει αρνητική επίδραση που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (26,10%) , τη μέση ετήσια νέφωση (18,42%) , τη μέση ετήσια υγρασία (με βαρύτητα 18,42%) , τη μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα (12,12%) . Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση , η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $26,10\% + 18,42\% + 18,42\% + 12,12\% = 74,97\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της μέσης ετήσιας υγρασίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $18,42\% / 74,97\% = 24,57\%$  .

Στη μελέτη των Al Awadhi et all. (2025) αναφέρεται ότι η σχετική υγρασία, η οποία μετρά την ποσότητα υδρατμών στον αέρα, επηρεάζει την απόδοση των ηλιακών πάνελ. Τα υψηλότερα επίπεδα υγρασίας αντιστοιχούν σε χαμηλότερη απόδοση των πάνελ. Στη συγκεκριμένη μελέτη ελέγχονται τόσο μετεωρολογικές όσο και άλλες παράμετροι. Οι μετεωρολογικές περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία (22,80 % ) , την ταχύτητα του ανέμου (5,7%) , οι βροχοπτώσεις ( 4,6%), η υγρασία ( 4,6%) και η Θερμοκρασία (2,8%) . Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση , η συνολική βαρύτητα των μετεωρολογικών παραμέτρων είναι  $22,80\% + 5,70\% + 4,60\% + 4,60\% = 40,50\%$  και η προσαρμοσμένη βαρύτητα της υγρασίας ως προς τις εξεταζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους είναι ίση με  $4,60\% / 40,50\% = 11,36\%$  .

### Σχολιασμός Βιβλιογραφίας

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε , διαπιστώνεται μεγάλη διαφοροποίηση των ερευνητών ως προς τη βαρύτητα που αποδίδουν στην επίδραση της

υγρασίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα. Προκύπτει ακόμα ότι η επίδραση της στην καταλληλότητα μιας θέσης για χωροθέτηση φωτοβολταϊκών είναι αρνητική. Συγκεντρωτικά οι τιμές βαρύτητας που καταγράφηκαν είναι (4% , 11,36% , 24,57%)

### 6.5.6 Θεωρία στατιστικών δεικτών

Στα πλαίσια της αξιολόγησης των τιμών που καταγράφηκαν θα χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες στατιστικές έννοιες όπως αυτές καταγράφονται από τους Κοκολάκης & Σπηλιώτης (1999)

**Μέση τιμή :** Αν  $x$  το χαρακτηριστικό πληθυσμού η μέτρηση του οποίου σε τυχαίο δείγμα  $n$  έδωσε τα αποτελέσματα  $x_1, \dots, x_n$  μέση τιμή του δείγματος ονομάζεται η ποσότητα

$$\bar{X}(M) = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n x(j)$$

**Διασπορά:** Μια άλλη ποσότητα ενδεικτική της μεταβλητότητας του  $x$  είναι η διασπορά του δείγματος. Η ποσότητα αυτή είναι ένα μέτρο της μέσης τετραγωνικής απόστασης των αποτελεσμάτων  $x_1, \dots, x_n$  από το μέσο  $\bar{X}(M)$  του δείγματος και ορίζεται από τη σχέση.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}(M))^2$$

**Τυπική απόκλιση:** Ένα άλλο μέτρο μεταβλητότητας είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος  $x_1, \dots, x_n$  που ορίζεται από την τετραγωνική ρίζα της δειγματικής διασποράς και συμβολίζεται με  $s$ . Δηλαδή,

$$s = \left[ \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}(M))^2 \right]^{0,5}$$

**Συντελεστής μεταβλητότητας:** Για τη σύγκριση της μεταβλητότητας δειγμάτων από διαφορετικούς πληθυσμούς χρησιμοποιούμε το αδιάστατο μέγεθος  $\lambda = 100 * s / \bar{X}(M)$

**Διάμεσος:** Διάμεσος είναι η παρατήρηση εκείνη η οποία είναι μεγαλύτερη από το 50% των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα από το τυχαίο δείγμα  $x_1, \dots, x_n$ , λαμβάνουμε το διατεταγμένο δείγμα  $x^*_1, \dots, x^*_n$ , όπου  $x^*_I \leq x^*_{I+1}$  ( $I = 1, \dots, n-1$ ). Έτσι αν  $n = 2m-1$  ως διάμεσος λαμβάνεται η τιμή  $X_\delta = x^*_m$  και αν  $n=2m$  η τιμή  $X_\delta = (x^*_m + x^*_{m+1}) / 2$

### 6.5.7. Πρόταση συντελεστών βαρύτητας με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική επισκόπηση 20 πρόσφατων επιστημονικών άρθρων τα οποία έχουν ως αντικείμενο μελέτης της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων.

Σε 9 από αυτά, κατά την πραγματοποιούμενη αξιολόγηση υπεισέρχονται μετεωρολογικές παράμετροι. Οι μετεωρολογικές παράμετροι που εντοπίστηκαν και η συχνότητα εμφάνισης τους στις συγκεκριμένες μελέτες έχουν ως εξής:

- ηλιακή ακτινοβολία στο 100% των άρθρων
- θερμοκρασία στο 78% των άρθρων
- νέφωση στο 44% των άρθρων
- άνεμος στο 33% των άρθρων
- υγρασία στο 33% των άρθρων

#### Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία καταγράφεται ως σημαντικότερη παράμετρος καταλληλότητας μιας τοποθεσίας. Οι βαρύτητες που καταγράφηκαν με αναγωγή στο υποσύνολο των μετεωρολογικών είναι οι ακόλουθες:

( 21.84% , 34.69% , **50.00%** , **51.23%** , **51,50%** , **55.56%** , **56.30%** , 82.23% , 89.52%)

Δεδομένου του επαρκούς μεγέθους του δείγματος και προκειμένου να αποκλειστούν ακραίες τιμές , το εξεταζόμενο δείγμα επαναπροσδιορίζεται σε:

( **50.00%** , **51.23%** , **51,50%** , **55.56%** , **56.30%** ) και παρουσιάζει

Τυπική απόκλιση = 2,82%

Μέση τιμή = 52,92%

Διάμεσο = 51,50%

Συντελεστή μεταβλητότητας = 5,33%

#### Θερμοκρασία

Οι βαρύτητες που καταγράφηκαν με αναγωγή στο υποσύνολο των μετεωρολογικών είναι οι ακόλουθες:

( **6.91%** , **10.48%** , **12.00%** , **16.17%** , **28.27%** , **30.25%** , **44.44%** )

Το ανωτέρω δείγμα τιμών παρουσιάζει

Τυπική απόκλιση = 13,55%

Μέση τιμή = 21,22%

Διάμεσο = 16,17%

Συντελεστή μεταβλητότητας = 63,85%

### **Ηλιοφάνεια/νεφοκάλυψη**

Οι βαρύτητες που καταγράφηκαν με αναγωγή στο υποσύνολο των μετεωρολογικών είναι οι ακόλουθες:

( 15,26% , 20,49% , 24,57% , 25,00% )

Το ανωτέρω δείγμα τιμών παρουσιάζει

Τυπική απόκλιση = 4,53%

Μέση τιμή = 21,33%

Διάμεσο = 22,53%

Συντελεστή μεταβλητότητας = 21,23 %

### **Άνεμος**

Οι βαρύτητες που καταγράφηκαν με αναγωγή στο υποσύνολο των μετεωρολογικών είναι οι ακόλουθες:

( 8,00% , 14,07% , 17,77% )

Το ανωτέρω δείγμα τιμών παρουσιάζει

Τυπική απόκλιση = 4,93%

Μέση τιμή = 13,28%

Διάμεσο = 14,07%

Συντελεστή μεταβλητότητας = 37,15 %

### **Υγρασία**

Οι βαρύτητες που καταγράφηκαν με αναγωγή στο υποσύνολο των μετεωρολογικών είναι οι ακόλουθες:

( 4,00% , 11,36% , 24,57% )

Το ανωτέρω δείγμα τιμών παρουσιάζει

Τυπική απόκλιση = 10,42%

Μέση τιμή = 13,31%

Διάμεσο = 11,36%

Συντελεστή μεταβλητότητας = 78,31 %

### **Επιλογή συντελεστών βαρύτητας**

Η επιλογή αντιπροσωπευτικών τιμών από τα δείγματα των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιείται με τη διάμεσο προκειμένου να αποκλειστούν ακραίες τιμές. Συνεπώς οι αποδιδόμενες βαρύτητες είναι οι ακόλουθες:

Ηλιακή ακτινοβολία = 51,50%

Θερμοκρασία = 16,17 %

Νέφωση = 22,53%

Άνεμος = 14,07%

Υγρασία = 11,36%

Επειδή το άθροισμα των ποσοστών βαρύτητας προσδιορίζεται σε 115,63% θα πρέπει να πραγματοποιηθεί κατάλληλη προσαρμογή.

Δεδομένου ότι στα δείγματα που επεξεργάστηκαν η ηλιακή ακτινοβολία και η νέφωση παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά βαρύτητας και τους χαμηλότερες συντελεστές μεταβλητότητας υιοθετούνται αυτούσιες και ειδικότερα ποσοστό 51,50% για την ηλιακή ακτινοβολία και 22,53% για τη νέφωση. Το εναπομείναν ποσοστό που ισούται με 25,97% κατανέμεται αναλογικά , ως προς τους αρχικά προσδιορισθέντες συντελεστές βαρύτητας , στις παραμέτρους του ανέμου , της υγρασίας και της θερμοκρασίας.

Ο συντελεστής προσαρμογής ισούται με

$$(100\% - 51,50\% - 22,53\%) / (14,07\% + 11,36\% + 16,17\%) = 0,6243$$

Τελικώς οι προσαρμοσμένοι συντελεστές βαρύτητας ορίζονται ως εξής:

$$\text{Ηλιακή ακτινοβολία} = 1,0000 * 51,50\% = 51,50\%$$

$$\text{Νέφωση} = 1,0000 * 22,53\% = 22,53\%$$

$$\text{Άνεμος} = 0,6243 * 14,07\% = 8,79\%$$

$$\text{Υγρασία} = 0,6243 * 11,36\% = 7,09\%$$

$$\text{Θερμοκρασία} = 0,6243 * 16,17\% = 10,09\%$$

#### **6.5.8. Συγκριτική παράθεση συντελεστών βαρύτητας της παρούσας εργασίας και της μελέτης των Karadöl & Yildirim (2025)**

Το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την αξιολόγηση της επιρροής των μετεωρολογικών παραμέτρων στην καταλληλότητα περιοχών για την χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάρκων.

Κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε εντοπίστηκαν 9 άρθρα στα πλαίσια της αξιολόγησης των οποίων υπεισέρχονται οι ακόλουθες μετεωρολογικοί παράγοντες:

- Ηλιακή ακτινοβολία
- Θερμοκρασία
- Νέφωση ή Ηλιοφάνεια
- Άνεμος
- Υγρασία

Καθώς οι παράγοντες αυτοί διαφοροποιούν την καταλληλότητα εναλλακτικών περιοχών ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει το ερώτημα της αναζήτησης της βαρύτητας με την οποία συμμετέχουν στην επίδραση αυτή.

Η μελέτη Karadöl & Yildirim (2025) είναι η μοναδική από εκείνες που μελετήθηκαν στην οποία εξετάζεται, αντίστοιχα με την παρούσα εργασία, το πρόβλημα της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών υπό των πρίσμα της επιρροής αμιγώς μετεωρολογικών παραγόντων και ταυτόχρονα συμπεριλαμβάνει όλα τα ανωτέρω κριτήρια. Στην εργασία αυτή αποδίδονται συντελεστές βαρύτητας σε κάθε κριτήριο έπειτα από εξέταση της βιβλιογραφίας και λαμβάνοντας υπόψη τη γνώμη ειδικών.

Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ανωτέρω , έπειτα από επεξεργασία των βιβλιογραφικών δεδομένων από εννέα σχετικά άρθρα προτείνονται αντίστοιχοι συντελεστές βαρύτητας για κάθε ένα από τους μετεωρολογικούς παράγοντες που καταγράφηκαν.

Η συγκριτική παράθεση των εν λόγω συντελεστών καταγράφεται ακολούθως.

| Παράγοντες         | Βιβλιογραφία | Karadöl & Yildirim |
|--------------------|--------------|--------------------|
| Ηλιακή ακτινοβολία | 51,50%       | 50%                |
| Νέφωση             | 22,53%       | 25%                |
| Άνεμος             | 8,79%        | 8%                 |
| Υγρασία            | 7,09%        | 4%                 |
| Θερμοκρασία        | 10,09%       | 12%                |
| Σύνολο             | 100,00%      | 99%                |

Εικόνα 78. Συντελεστές βαρύτητας ελεγχόμενων κριτηρίων έπειτα από βιβλιογραφική έρευνα και σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim (2025)

Όπως διαπιστώνεται στο άρθρο των Karadöl & Yildirim (2025) το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας υπολείπεται κατά 1% από το ορθόν σύνολο του 100% , πιθανόν λόγω στρογγυλοποιήσεων. Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη μονάδα επιμερίζεται αναλογικά τους εξεταζόμενους παράγοντες και ο ανωτέρω πίνακας αναδιαμορφώνεται ως ακολούθως

| Παράγοντες         | Βιβλιογραφία | Karadöl & Yildirim |
|--------------------|--------------|--------------------|
| Ηλιακή ακτινοβολία | 51,50%       | 50,50%             |
| Νέφωση             | 22,53%       | 25,25%             |
| Άνεμος             | 8,79%        | 8,08%              |
| Υγρασία            | 7,09%        | 4,04%              |
| Θερμοκρασία        | 10,09%       | 12,12%             |
| Σύνολο             | 100,00%      | 100%               |

Εικόνα 79. Αναδιαμορφωμένοι συντελεστές βαρύτητας ελεγχόμενων κριτηρίων έπειτα από βιβλιογραφική έρευνα και σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim (2025)

## 6.6 Εφαρμογή της μεθόδου και παρουσίαση αποτελεσμάτων

### 6.6.1 Παραδοχές μελέτης

Ως preference function ορίζεται η V shape η οποία είναι κατάλληλη για ποσοτικά κριτήρια και για μικρές αποκλίσεις όπως αυτές που καταγράφονται στα δεδομένα του υπό εξέταση προβλήματος.

Τα υπό εξέταση κριτήρια και η επίδραση τους ορίζονται ως εξής:

- 1) **Ηλιακή ακτινοβολία.** Αξιολογείται μέσω της ετήσιας οριζόντιας ακτινοβολίας όπως αυτή προέκυψε από τον GIS Χάρτη ηλιακών πόρων © 2021 Solargis και η επίδραση του κριτηρίου είναι θετική
- 2) **Ηλιοφάνεια/νέφωση.** Αξιολογείται μέσω της μέσης ετήσιας ηλιοφάνειας όπως αυτή προκύπτει από τα μετεωρολογικά δεδομένα της EMY και η επίδραση του κριτηρίου είναι θετική.
- 3) **Άνεμος.** Αξιολογείται μέσω της μέγιστης ετήσιας ταχύτητας ανέμου για κάθε θέση. Όλες οι εξεταζόμενες θέσεις παρουσιάζουν μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη των 3 m/s έως 4m/s. Στο εύρος αυτό η ταχύτητα του ανέμου, όπως ήδη αναλύθηκε, έχει θετική επίδραση. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου, η επίδραση του ανέμου είναι αρνητική καθώς αυξάνει το κόστος της κατασκευής. Για το λόγοι αυτό αξιολογείται η μέγιστη ταχύτητα ανέμου και η επίδραση του κριτηρίου είναι αρνητική.
- 4) **Υγρασία.** Αξιολογείται μέσω της μέσης ετήσιας ακτινοβολίας όπως αυτή προκύπτει από τα μετεωρολογικά δεδομένα της EMY και η επίδραση του κριτηρίου είναι αρνητική.
- 5) **Θερμοκρασία.** Αξιολογείται μέσω της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας όπως αυτή προκύπτει από τα μετεωρολογικά δεδομένα της EMY και η επίδραση του κριτηρίου είναι θετική.

### Κατώφλια προτίμησης

Ορίζεται κατώφλι προτίμησης στο 65% του εύρους των τιμών για κάθε κριτήριο και ειδικότερα:

- 1) Ετήσια οριζόντια ακτινοβολία:  $0.65 * (1.899 - 1.534) = 237,25 \text{ Kwh/m}^2$
- 2) Μέση ετήσια θερμοκρασία:  $0,65 * (19,33 - 13) = 4,12 \text{ C}^\circ$
- 3) Μέγιστη ετήσια ταχύτητα ανέμου:  $0,65 * (46 - 25) = 13,65 \text{ m/s}$

4) Μέση ετήσια υγρασία:  $0,65 * (68,58 - 64,50) = 2,65 \%$

5) Μέση ετήσια ηλιοφάνεια:  $0,65 * (8,67 - 6,75) = 1,25 \text{ h}$

### 6.6.2 Σχετικά με το πρόγραμμα visual promethee

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Visual Promethee. Σύμφωνα με το manual του προγράμματος, η εισαγωγή δεδομένων και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται ως ακολούθως:

#### Το Κύριο Παράθυρο (Main Window) του Visual PROMETHEE

Το κύριο παράθυρο (Main Window) του λογισμικού Visual PROMETHEE αποτελεί το βασικό περιβάλλον εργασίας, στο οποίο πραγματοποιείται η εισαγωγή, διαχείριση και επεξεργασία των δεδομένων του προβλήματος πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η δομή του είναι οργανωμένη ιεραρχικά από το άνω προς το κάτω μέρος της οθόνης, με στόχο τη διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης του χρήστη.

Στο ανώτερο τμήμα του παραθύρου βρίσκεται το κύριο μενού (Main Menu), το οποίο παρέχει πρόσβαση σε όλες τις βασικές λειτουργίες του λογισμικού, όπως η διαχείριση αρχείων, η επεξεργασία δεδομένων και η εκτέλεση αναλύσεων.

Αμέσως κάτω από το κύριο μενού εμφανίζονται δύο γραμμές εργαλείων (toolbars):

- Η άνω γραμμή εργαλείων αφορά τη διαχείριση των δεδομένων (data management), όπως η δημιουργία, αποθήκευση και τροποποίηση του μοντέλου.
- Η κάτω γραμμή εργαλείων σχετίζεται με τη διαχείριση της ανάλυσης (analysis management), παρέχοντας γρήγορη πρόσβαση σε λειτουργίες όπως η εκτέλεση των μεθόδων PROMETHEE και των σχετικών εργαλείων οπτικοποίησης.

Το κεντρικό και σημαντικότερο τμήμα του παραθύρου αποτελεί το υπολογιστικό φύλλο (spreadsheet), στο οποίο εμφανίζονται και επεξεργάζονται τα δεδομένα του προβλήματος. Στο επάνω μέρος του φύλλου παρουσιάζονται το όνομα του ενεργού σεναρίου, τα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς και επιλογές ενεργοποίησης/απενεργοποίησής τους. Παράλληλα, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τις μονάδες μέτρησης και την ομαδοποίηση των κριτηρίων.

Το υπολογιστικό φύλλο οργανώνεται σε τρεις βασικές ενότητες:

- **Preferences (Προτιμήσεις):**

Περιλαμβάνει τις βασικές παραμέτρους κάθε κριτηρίου. Συγκεκριμένα, ο χρήστης μπορεί να ορίσει:

- αν το κριτήριο πρέπει να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται,

- ο το βάρος του (με αυτόματη κανονικοποίηση από το σύστημα),
  - ο τον τύπο της συνάρτησης προτίμησης,
  - ο τα κατώφλια αδιαφορίας (Q), προτίμησης (P) και Gaussian (S),
  - ο καθώς και τον τρόπο έκφρασης των κατωφλίων (απόλυτα ή ποσοστιαία).
- **Statistics (Στατιστικά):**  
Παρέχει περιγραφικά στατιστικά για κάθε κριτήριο, όπως ελάχιστη και μέγιστη τιμή, μέσο όρο και τυπική απόκλιση, με βάση τις ενεργές εναλλακτικές.
  - **Evaluations (Αξιολογήσεις):**  
Περιλαμβάνει τις επιδόσεις των εναλλακτικών (actions) ως προς τα κριτήρια. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μία εναλλακτική, ενώ παρέχεται δυνατότητα ενεργοποίησης/απενεργοποίησής της. Οι τιμές μπορούν να εισαχθούν είτε ως αριθμητικά δεδομένα (για ποσοτικά κριτήρια) είτε μέσω προκαθορισμένων επιλογών (για ποιοτικά κριτήρια). Επιπλέον, υποστηρίζεται η διαχείριση ελλιπών δεδομένων.

## PROMETHEE I Μερική κατάταξη

Η μέθοδος PROMETHEE I παρέχει μια μερική κατάταξη (partial ranking) των εναλλακτικών λύσεων, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό δύο ροών προτίμησης: της θετικής ροής  $\Phi^+$  και της αρνητικής ροής  $\Phi^-$

Η θετική ροή προτίμησης  $\Phi^+$  (outgoing flow) εκφράζει τον βαθμό στον οποίο μια εναλλακτική υπερέχει των υπολοίπων και, συνεπώς, αποτελεί μέτρο «δύναμης». Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της  $\Phi^+$  τόσο πιο ισχυρή θεωρείται η εναλλακτική. Στο περιβάλλον του Visual PROMETHEE, η ροή αυτή απεικονίζεται στην αριστερή κάθετη μπάρα, όπου οι υψηλότερες τιμές (καλύτερες επιδόσεις) εμφανίζονται στο άνω μέρος με πράσινο χρώμα, ενώ οι χαμηλότερες στο κάτω μέρος με κόκκινο.

Αντίστοιχα, η αρνητική ροή προτίμησης  $\Phi^-$  (incoming flow) εκφράζει τον βαθμό στον οποίο μια εναλλακτική υστερεί έναντι των άλλων και λειτουργεί ως μέτρο «αδυναμίας». Στην περίπτωση αυτή, μικρότερες τιμές είναι προτιμότερες. Στο Visual PROMETHEE, η  $\Phi^-$  απεικονίζεται στη δεξιά κάθετη μπάρα, όπου οι χαμηλότερες τιμές (καλύτερες επιδόσεις) εμφανίζονται στο άνω μέρος με πράσινο, ενώ οι υψηλότερες στο κάτω μέρος με κόκκινο.

Αν και τόσο η  $\Phi^+$  όσο και η  $\Phi^-$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατάταξη των εναλλακτικών, δεν οδηγούν απαραίτητα στην ίδια σειρά κατάταξης. Αυτό οφείλεται στη φύση των πολυκριτηριακών προβλημάτων, όπου συχνά παρατηρούνται αντικρουόμενες επιδόσεις: μία εναλλακτική μπορεί να υπερέχει σε ορισμένα κριτήρια, ενώ μια άλλη να

υπερέχει σε διαφορετικά. Ως αποτέλεσμα, διαφορετικοί τρόποι αξιολόγησης μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικές συγκρίσεις.

Η μέθοδος PROMETHEE I υιοθετεί μια συντηρητική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη μόνο εκείνες τις προτιμήσεις που επιβεβαιώνονται ταυτόχρονα από τις δύο ροές. Συνεπώς, η κατάταξη που προκύπτει είναι μερική: σε περιπτώσεις όπου οι συγκρίσεις βάσει  $\Phi^+$  και  $\Phi^-$  έρχονται σε σύγκρουση, οι αντίστοιχες εναλλακτικές θεωρούνται ασύγκριτες (incomparable). Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς αναδεικνύει τις περιπτώσεις όπου η λήψη απόφασης είναι πιο σύνθετη και απαιτεί περαιτέρω ανάλυση.

Στο λογισμικό Visual PROMETHEE, η μερική κατάταξη απεικονίζεται γραφικά με τη χρήση γραμμών που συνδέουν τις τιμές  $\Phi^+$  (αριστερή μπάρα) και  $\Phi^-$  (δεξιά μπάρα) για κάθε εναλλακτική. Όταν η γραμμή μιας εναλλακτικής βρίσκεται εξ ολοκλήρου πάνω από τη γραμμή μιας άλλης, η πρώτη προτιμάται. Αντίθετα, όταν οι γραμμές δύο εναλλακτικών τέμνονται, αυτό υποδηλώνει ότι οι εναλλακτικές είναι ασύγκριτες στο πλαίσιο της PROMETHEE I.

## Πλήρης Κατάταξη PROMETHEE II

Η μέθοδος PROMETHEE II παρέχει μια πλήρη κατάταξη (complete ranking) των εναλλακτικών λύσεων, σε αντίθεση με τη PROMETHEE I που οδηγεί σε μερική κατάταξη. Η πλήρης αυτή κατάταξη βασίζεται στην έννοια της καθαρής ροής προτίμησης, η οποία προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ της θετικής και της αρνητικής ροής:  $\Phi = \Phi^+ - \Phi^-$

Η καθαρή ροή  $\Phi$  εκφράζει τη συνολική απόδοση μιας εναλλακτικής, συνδυάζοντας τόσο την ικανότητά της να υπερέχει των άλλων (μέσω της  $\Phi^+$ ) όσο και τον βαθμό στον οποίο υστερεί έναντι αυτών (μέσω της  $\Phi^-$ ). Οι τιμές της  $\Phi$  κυμαίνονται στο διάστημα  $[-1, +1]$ , όπου υψηλότερες τιμές υποδηλώνουν καλύτερη συνολική επίδοση.

Η βασική ιδιαιτερότητα της PROMETHEE II είναι ότι επιλύει τις αδυναμίες σύγκρισης που εμφανίζονται στη PROMETHEE I, παρουσιάζοντας μια πλήρη διάταξη όλων των εναλλακτικών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σύνθεσης των δύο ροών σε ένα ενιαίο μέτρο αξιολόγησης, γεγονός που διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων όταν απαιτείται σαφής ιεράρχηση.

Στο λογισμικό Visual PROMETHEE, η πλήρης κατάταξη απεικονίζεται σε ένα κατακόρυφο άξονα, όπου κάθε εναλλακτική τοποθετείται σύμφωνα με τη τιμή της καθαρής ροής  $\Phi$ . Οι εναλλακτικές με υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στο ανώτερο τμήμα του άξονα, υποδηλώνοντας μεγαλύτερη προτίμηση.

### Διάγραμμα PROMETHEE Diamond

Το PROMETHEE Diamond αποτελεί μια εναλλακτική γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων της μεθόδου PROMETHEE, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη οπτική κατανόηση της σχέσης μεταξύ των ροών  $\Phi^+$ ,  $\Phi^-$  και της καθαρής ροής  $\Phi$ .

Συγκεκριμένα, το διάγραμμα βασίζεται στο επίπεδο συντεταγμένων  $(\Phi^+, \Phi^-)$ , το οποίο παρουσιάζεται υπό μορφή τετραγώνου περιστρεμμένου κατά  $45^\circ$ , σχηματίζοντας ένα «διαμάντι». Ο προσανατολισμός αυτός επιτρέπει στον κατακόρυφο άξονα να αντιστοιχεί άμεσα στην καθαρή ροή  $\Phi$ , διευκολύνοντας την ερμηνεία της συνολικής επίδοσης των εναλλακτικών.

Κάθε εναλλακτική αναπαρίσταται ως ένας «κώνος» στο διάγραμμα, του οποίου η κορυφή βρίσκεται στο σημείο που αντιστοιχεί στις τιμές  $(\Phi^+, \Phi^-)$ . Η γεωμετρική αυτή απεικόνιση επιτρέπει την ταυτόχρονη αξιολόγηση τόσο της «δύναμης» όσο και της «αδυναμίας» κάθε εναλλακτικής.

Η ερμηνεία των σχέσεων μεταξύ των εναλλακτικών βασίζεται στη σχετική θέση των κώνων:

- Όταν ένας κώνος επικαλύπτει πλήρως έναν άλλο, αυτό υποδηλώνει σαφή προτίμηση της αντίστοιχης εναλλακτικής.
- Αντίθετα, όταν δύο κώνοι τέμνονται, αυτό υποδεικνύει ύπαρξη ασυμφωνίας ή αβεβαιότητας, η οποία σχετίζεται με περιπτώσεις αδυναμίας σύγκρισης που αναδεικνύονται κυρίως στη μερική κατάταξη (PROMETHEE I).

### Ανάλυση GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid)

Η μέθοδος GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) αποτελεί ένα συμπληρωματικό εργαλείο της οικογένειας μεθόδων PROMETHEE, το οποίο χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μέσω της γεωμετρικής αναπαράστασης των εναλλακτικών και των κριτηρίων, το GAIA διευκολύνει την κατανόηση της δομής του προβλήματος και των σχέσεων μεταξύ των εμπλεκόμενων στοιχείων.

Η βασική ιδέα του GAIA είναι η προβολή των δεδομένων σε ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο επίπεδο (GAIA plane), το οποίο προκύπτει από τεχνικές μείωσης διαστάσεων. Στο επίπεδο αυτό:

- Οι εναλλακτικές λύσεις (actions) απεικονίζονται ως σημεία.

- Τα κριτήρια απεικονίζονται ως διανύσματα (άξονες), των οποίων η κατεύθυνση και το μήκος εκφράζουν τη συμβολή και τη σύγκρουση μεταξύ των κριτηρίων.

Η σχετική θέση των σημείων και των διανυσμάτων επιτρέπει την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων:

- Εναλλακτικές που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τα κριτήρια.
- Διανύσματα με παρόμοια κατεύθυνση υποδηλώνουν κριτήρια που είναι συμβατά, ενώ αντίθετες κατευθύνσεις υποδηλώνουν συγκρούσεις.
- Η προβολή μιας εναλλακτικής πάνω σε έναν άξονα κριτηρίου αποτυπώνει την επίδοσή της ως προς το συγκεκριμένο κριτήριο.

Κεντρικό στοιχείο της ανάλυσης αποτελεί ο άξονας απόφασης (decision axis), ο οποίος αντιπροσωπεύει τη συνολική κατεύθυνση προτίμησης, λαμβάνοντας υπόψη τα βάρη των κριτηρίων. Εναλλακτικές που βρίσκονται πιο κοντά στην κατεύθυνση του άξονα αυτού θεωρούνται πιο προτιμητέες.

Στο περιβάλλον του Visual PROMETHEE, το παράθυρο GAIA παρέχει εκτεταμένες δυνατότητες αλληλεπίδρασης και προσαρμογής της απεικόνισης. Ο χρήστης μπορεί να ελέγχει την εμφάνιση των εναλλακτικών, των κριτηρίων και του άξονα απόφασης, να πραγματοποιεί μεγέθυνση/σμίκρυνση, καθώς και να εναλλάσσει μεταξύ δισδιάστατης και τρισδιάστατης προβολής. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα επισήμανσης συγκεκριμένων εναλλακτικών ή προβολής τους ως προς επιλεγμένα κριτήρια, διευκολύνοντας την εστιασμένη ανάλυση.

Η ποιότητα της αναπαράστασης στο επίπεδο GAIA αποτιμάται μέσω του ποσοστού πληροφoρίας που διατηρείται μετά τη μείωση διαστάσεων. Υψηλές τιμές (συνήθως με πράσινη ένδειξη στο λογισμικό) υποδηλώνουν αξιόπιστη απεικόνιση, ενώ χαμηλές τιμές (κόκκινη ένδειξη) απαιτούν προσεκτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

### **Διαστήματα Οπτικής Σταθερότητας (Visual Stability Intervals)**

Το εργαλείο Visual Stability Intervals αποτελεί ένα εξειδικευμένο μέσο ανάλυσης ευαισθησίας στο πλαίσιο της μεθοδολογίας PROMETHEE, το οποίο επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης των βαρών των κριτηρίων στις τελικές αξιολογήσεις και κατατάξεις των εναλλακτικών.

Η βασική αρχή λειτουργίας του εργαλείου στηρίζεται στη γραφική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του βάρους ενός επιλεγμένου κριτηρίου και της καθαρής ροής προτίμησης  $\Phi$  των εναλλακτικών. Συγκεκριμένα:

- Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το βάρος του εξεταζόμενου κριτηρίου, το οποίο μεταβάλλεται από 0% έως 100%.
- Ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στις τιμές της καθαρής ροής  $\Phi$ , δηλαδή στις συνολικές επιδόσεις των εναλλακτικών σύμφωνα με τη μέθοδο PROMETHEE II.

Για κάθε εναλλακτική σχεδιάζεται μια καμπύλη (ή ευθεία), η οποία αποτυπώνει τη μεταβολή της καθαρής ροής της καθώς αλλάζει το βάρος του συγκεκριμένου κριτηρίου. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατή η άμεση οπτική σύγκριση της ευαισθησίας των εναλλακτικών ως προς το εξεταζόμενο κριτήριο.

Στα άκρα του διαγράμματος:

- Στο δεξί άκρο (100%), το βάρος του κριτηρίου είναι απόλυτο, με αποτέλεσμα η κατάταξη να βασίζεται αποκλειστικά σε αυτό το κριτήριο.
- Στο αριστερό άκρο (0%), το κριτήριο δεν λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία αξιολόγησης.

Μια κατακόρυφη γραμμή (συνήθως χρωματισμένη) υποδεικνύει το τρέχον βάρος του κριτηρίου, ενώ τα σημεία τομής της γραμμής αυτής με τις καμπύλες των εναλλακτικών προσδιορίζουν τις αντίστοιχες τιμές  $\Phi$  και συνεπώς την πλήρη κατάταξη PROMETHEE II για τη συγκεκριμένη τιμή βάρους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα προσδιορισμού των λεγόμενων Διαστημάτων Σταθερότητας Βάρους (Weight Stability Intervals – WSI). Όταν ενεργοποιείται η σχετική επιλογή, εμφανίζονται δύο κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές, οι οποίες οριοθετούν το διάστημα τιμών του βάρους εντός του οποίου η κατάταξη (ή μέρος αυτής) παραμένει αμετάβλητη. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει το επίπεδο σταθερότητας, δηλαδή τον αριθμό των κορυφαίων εναλλακτικών που εξετάζονται (π.χ. μόνο η πρώτη θέση ή ολόκληρη η κατάταξη).

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων επιτρέπει την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων. Για παράδειγμα, εναλλακτικές των οποίων η καθαρή ροή μειώνεται με την αύξηση του βάρους ενός κριτηρίου είναι πιθανό να υστερούν ως προς αυτό, ενώ αντίθετα εκείνες που βελτιώνουν τη θέση τους ευνοούνται από την ενίσχυση του συγκεκριμένου κριτηρίου.

Συνολικά, το εργαλείο Visual Stability Intervals συμβάλλει ουσιαστικά στην κατανόηση της ευαισθησίας και της σταθερότητας των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας στον υπεύθυνο λήψης

αποφάσεων να εντοπίσει κρίσιμα κριτήρια και να αξιολογήσει την αξιοπιστία της τελικής κατάταξης υπό μεταβολές των παραμέτρων.

### **Διάγραμμα PROMETHEE Rainbow**

Το PROMETHEE Rainbow αποτελεί μια γραφική αναπαράσταση της μεθόδου PROMETHEE II, η οποία προσφέρει μια αποσυνθετική (disaggregated) προσέγγιση της πλήρους κατάταξης των εναλλακτικών. Σε αντίθεση με την απλή παρουσίαση της καθαρής ροής  $\Phi$ , το εργαλείο αυτό επιτρέπει την ανάλυση της συμβολής κάθε κριτηρίου στο τελικό αποτέλεσμα.

Συγκεκριμένα, για κάθε εναλλακτική κατασκευάζεται μια οριζόντια ράβδος, η οποία αποτελείται από επιμέρους τμήματα (slices), όσα και τα κριτήρια του προβλήματος. Κάθε τμήμα αντιπροσωπεύει τη συμβολή ενός συγκεκριμένου κριτηρίου στην καθαρή ροή προτίμησης  $\Phi$  της εναλλακτικής, λαμβάνοντας υπόψη και το αντίστοιχο βάρος του κριτηρίου.

Τα τμήματα της ράβδου διακρίνονται σε:

- θετικές συνεισφορές, οι οποίες ενισχύουν τη συνολική επίδοση της εναλλακτικής,
- αρνητικές συνεισφορές, οι οποίες την επιβαρύνουν.

Η συνολική καθαρή ροή  $\Phi$  προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ του αθροίσματος των θετικών και των αρνητικών συνεισφορών. Με τον τρόπο αυτό, το διάγραμμα καθιστά σαφές πώς διαμορφώνεται η τελική αξιολόγηση κάθε εναλλακτικής, αποκαλύπτοντας τα κριτήρια που την ευνοούν ή την αποδυναμώνουν.

### **Διαδραστική Ανάλυση Βαρών (Walking Weights)**

Το εργαλείο Walking Weights αποτελεί ένα δυναμικό μέσο ανάλυσης ευαισθησίας στο πλαίσιο της μεθοδολογίας PROMETHEE, το οποίο επιτρέπει τη διαδραστική τροποποίηση των βαρών των κριτηρίων και την άμεση παρατήρηση της επίδρασής τους στα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Η διεπαφή του εργαλείου χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα:

- Στο άνω τμήμα, απεικονίζονται οι τιμές της καθαρής ροής προτίμησης  $\Phi$  για τις ενεργές εναλλακτικές, σύμφωνα με τη μέθοδο PROMETHEE II.
- Στο κάτω τμήμα, παρουσιάζονται τα σχετικά βάρη (σε ποσοστιαία μορφή) των κριτηρίων, των ομάδων κριτηρίων ή των συστάδων (clusters).

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ένα κριτήριο είτε απευθείας από τη γραφική απεικόνιση (μέσω της αντίστοιχης ράβδου) είτε από σχετική λίστα επιλογής, και στη συνέχεια να μεταβάλλει το βάρος του χρησιμοποιώντας έναν μηχανισμό ολίσθησης (slider). Καθώς πραγματοποιείται η μεταβολή, οι υπολογισμοί ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο και οι αλλαγές αποτυπώνονται άμεσα σε όλα τα ανοιχτά παράθυρα ανάλυσης (π.χ. κατατάξεις, γραφήματα GAIA, PROMETHEE Rainbow).

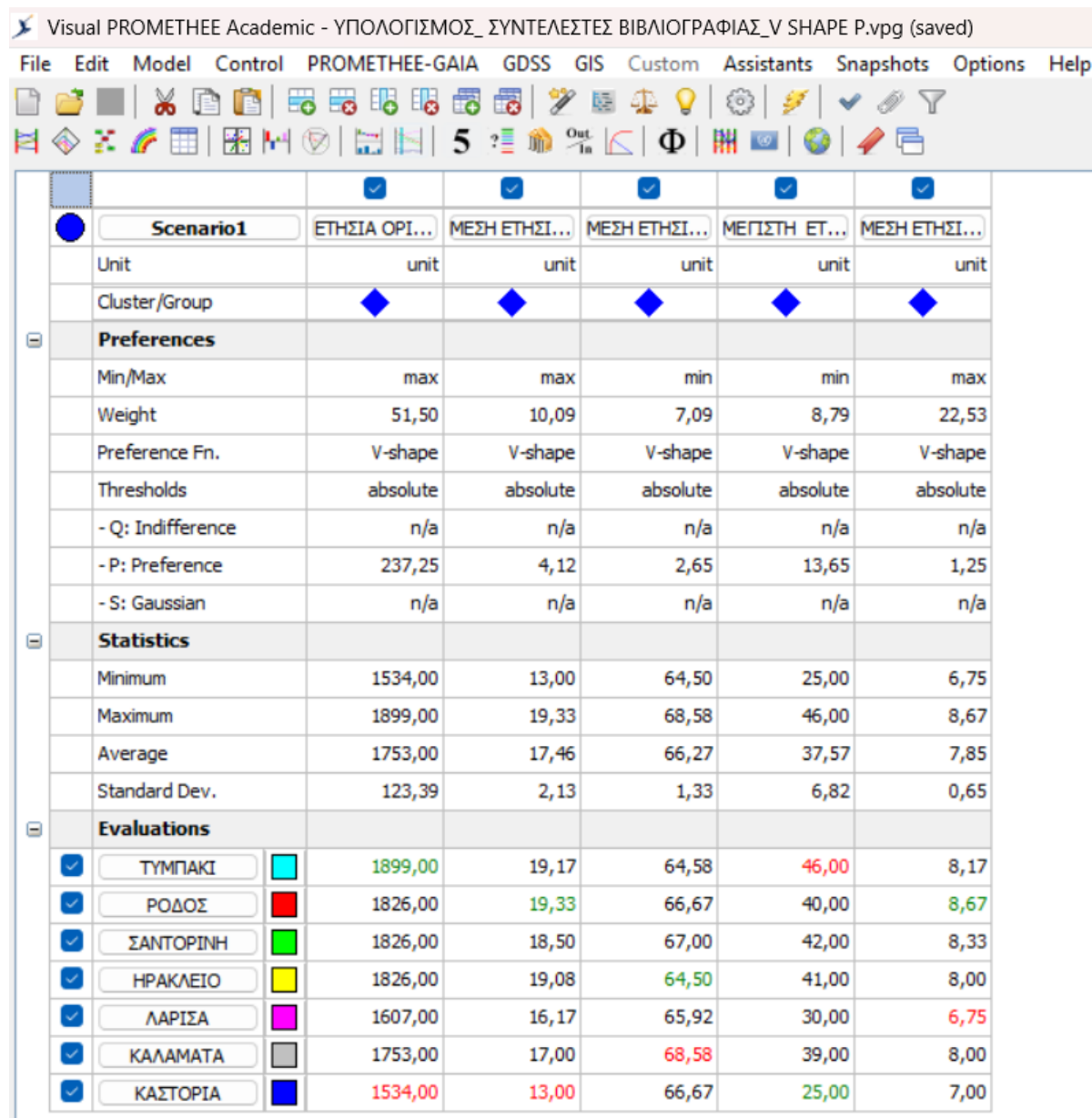
Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα σταθεροποίησης (locking) του βάρους ενός κριτηρίου μέσω ειδικής ένδειξης (εικονίδιο λουκέτου). Όταν ένα βάρος είναι «κλειδωμένο», παραμένει σταθερό κατά τις μεταβολές των υπολοίπων βαρών, επιτρέποντας τη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων υπό συγκεκριμένους περιορισμούς. Η απενεργοποίηση της επιλογής επαναφέρει τη δυνατότητα ελεύθερης μεταβολής.

### 6.6.3 Επίλυση με συντελεστές βαρύτητας από επεξεργασία της βιβλιογραφίας

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται το Main Window του λογισμικού Visual PROMETHEE όπου πραγματοποιείται η εισαγωγή, η διαχείριση και η επεξεργασία των δεδομένων του προβλήματος πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Visual PROMETHEE Academic - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ\_ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ\_V SHAPE P.vpg (saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help



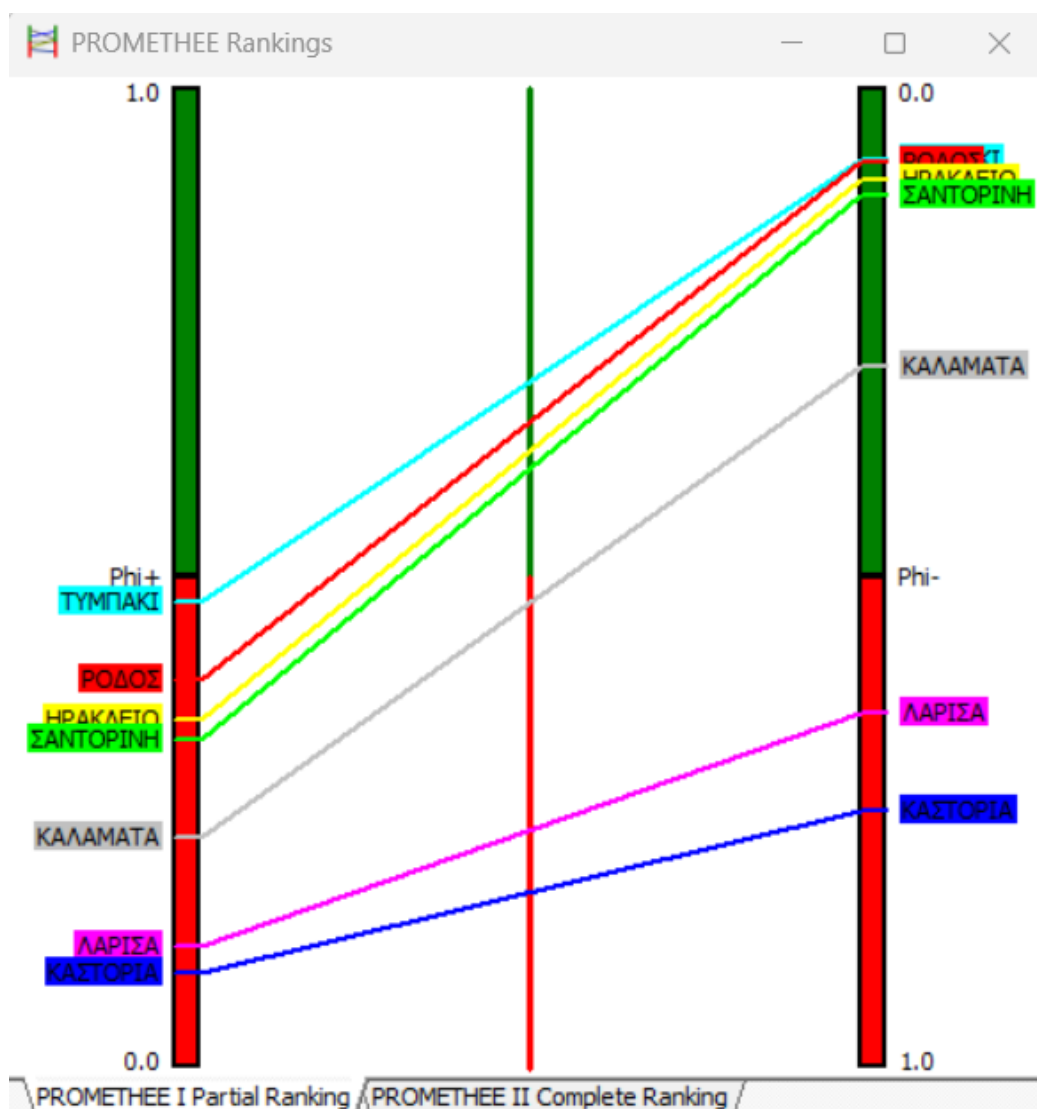
|                                               | Scenario1 | ΕΤΗΣΙΑ ΟΡΙ... | ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙ... | ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙ... | ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΤ... | ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙ... |
|-----------------------------------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Unit                                          |           | unit          | unit          | unit          | unit          | unit          |
| Cluster/Group                                 |           | ◆             | ◆             | ◆             | ◆             | ◆             |
| <b>Preferences</b>                            |           |               |               |               |               |               |
| Min/Max                                       |           | max           | max           | min           | min           | max           |
| Weight                                        |           | 51,50         | 10,09         | 7,09          | 8,79          | 22,53         |
| Preference Fn.                                |           | V-shape       | V-shape       | V-shape       | V-shape       | V-shape       |
| Thresholds                                    |           | absolute      | absolute      | absolute      | absolute      | absolute      |
| - Q: Indifference                             |           | n/a           | n/a           | n/a           | n/a           | n/a           |
| - P: Preference                               |           | 237,25        | 4,12          | 2,65          | 13,65         | 1,25          |
| - S: Gaussian                                 |           | n/a           | n/a           | n/a           | n/a           | n/a           |
| <b>Statistics</b>                             |           |               |               |               |               |               |
| Minimum                                       |           | 1534,00       | 13,00         | 64,50         | 25,00         | 6,75          |
| Maximum                                       |           | 1899,00       | 19,33         | 68,58         | 46,00         | 8,67          |
| Average                                       |           | 1753,00       | 17,46         | 66,27         | 37,57         | 7,85          |
| Standard Dev.                                 |           | 123,39        | 2,13          | 1,33          | 6,82          | 0,65          |
| <b>Evaluations</b>                            |           |               |               |               |               |               |
| <input checked="" type="checkbox"/> ΤΥΜΠΑΚΙ   |           | 1899,00       | 19,17         | 64,58         | 46,00         | 8,17          |
| <input checked="" type="checkbox"/> ΡΟΔΟΣ     |           | 1826,00       | 19,33         | 66,67         | 40,00         | 8,67          |
| <input checked="" type="checkbox"/> ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ |           | 1826,00       | 18,50         | 67,00         | 42,00         | 8,33          |
| <input checked="" type="checkbox"/> ΗΡΑΚΛΕΙΟ  |           | 1826,00       | 19,08         | 64,50         | 41,00         | 8,00          |
| <input checked="" type="checkbox"/> ΛΑΡΙΣΑ    |           | 1607,00       | 16,17         | 65,92         | 30,00         | 6,75          |
| <input checked="" type="checkbox"/> ΚΑΛΑΜΑΤΑ  |           | 1753,00       | 17,00         | 68,58         | 39,00         | 8,00          |
| <input checked="" type="checkbox"/> ΚΑΣΤΟΡΙΑ  |           | 1534,00       | 13,00         | 66,67         | 25,00         | 7,00          |

Εικόνα 80. Το βασικό περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Visual PROMETHEE για την εισαγωγή και διαχείριση δεδομένων επίλυσης. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της PROMETHEE I, με κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων σε μορφή πίνακα και σε μορφή γραφικής παράστασης.

| PROMETHEE Flow Table |           |  |         |        |        |
|----------------------|-----------|--|---------|--------|--------|
| Rank                 | action    |  | Phi     | Phi+   | Phi-   |
| 1                    | ΤΥΜΠΑΚΙ   |  | 0,4011  | 0,4749 | 0,0737 |
| 2                    | ΡΟΔΟΣ     |  | 0,3208  | 0,3960 | 0,0752 |
| 3                    | ΗΡΑΚΛΕΙΟ  |  | 0,2614  | 0,3541 | 0,0926 |
| 4                    | ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ |  | 0,2262  | 0,3350 | 0,1088 |
| 5                    | ΚΑΛΑΜΑΤΑ  |  | -0,0507 | 0,2333 | 0,2840 |
| 6                    | ΛΑΡΙΣΑ    |  | -0,5168 | 0,1224 | 0,6392 |
| 7                    | ΚΑΣΤΟΡΙΑ  |  | -0,6421 | 0,0961 | 0,7382 |

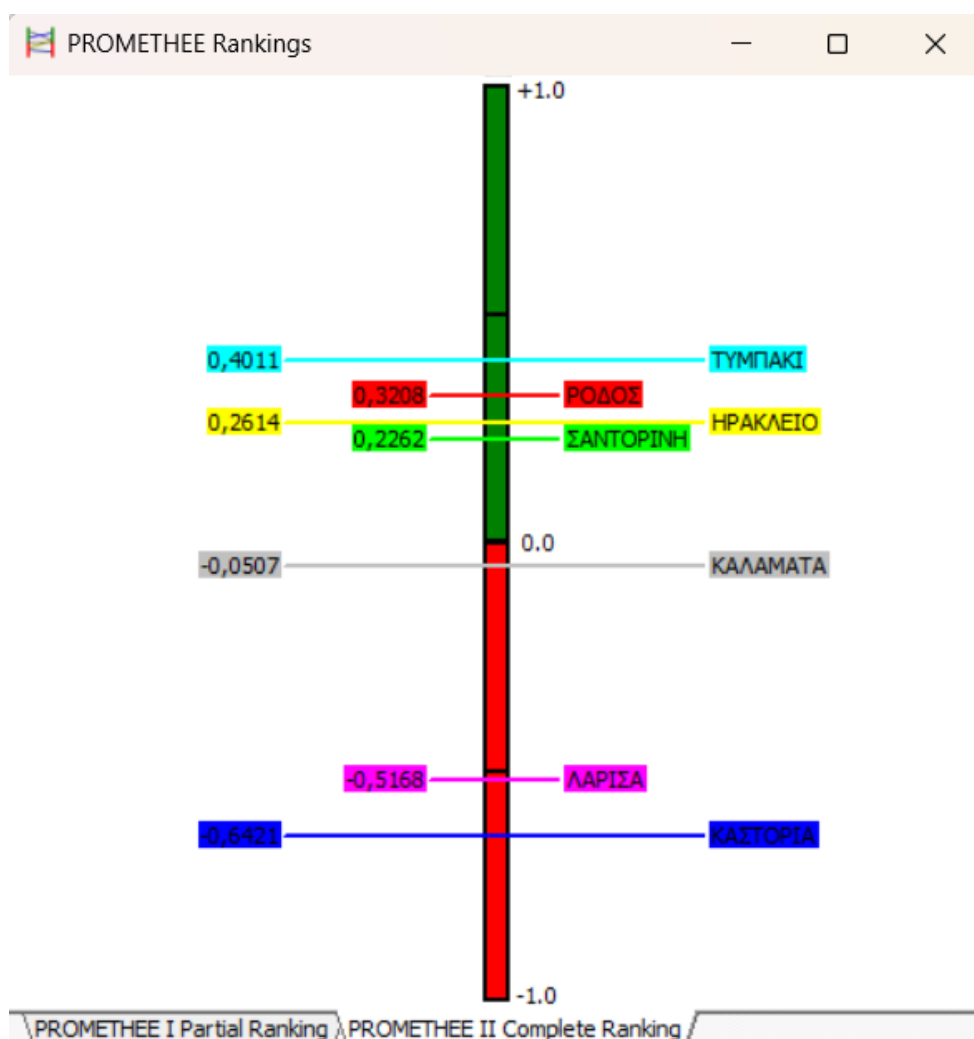
Εικόνα 81. Τιμές των ροών προτίμησης και τα αποτελέσματα της κατάταξης των εναλλακτικών. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.



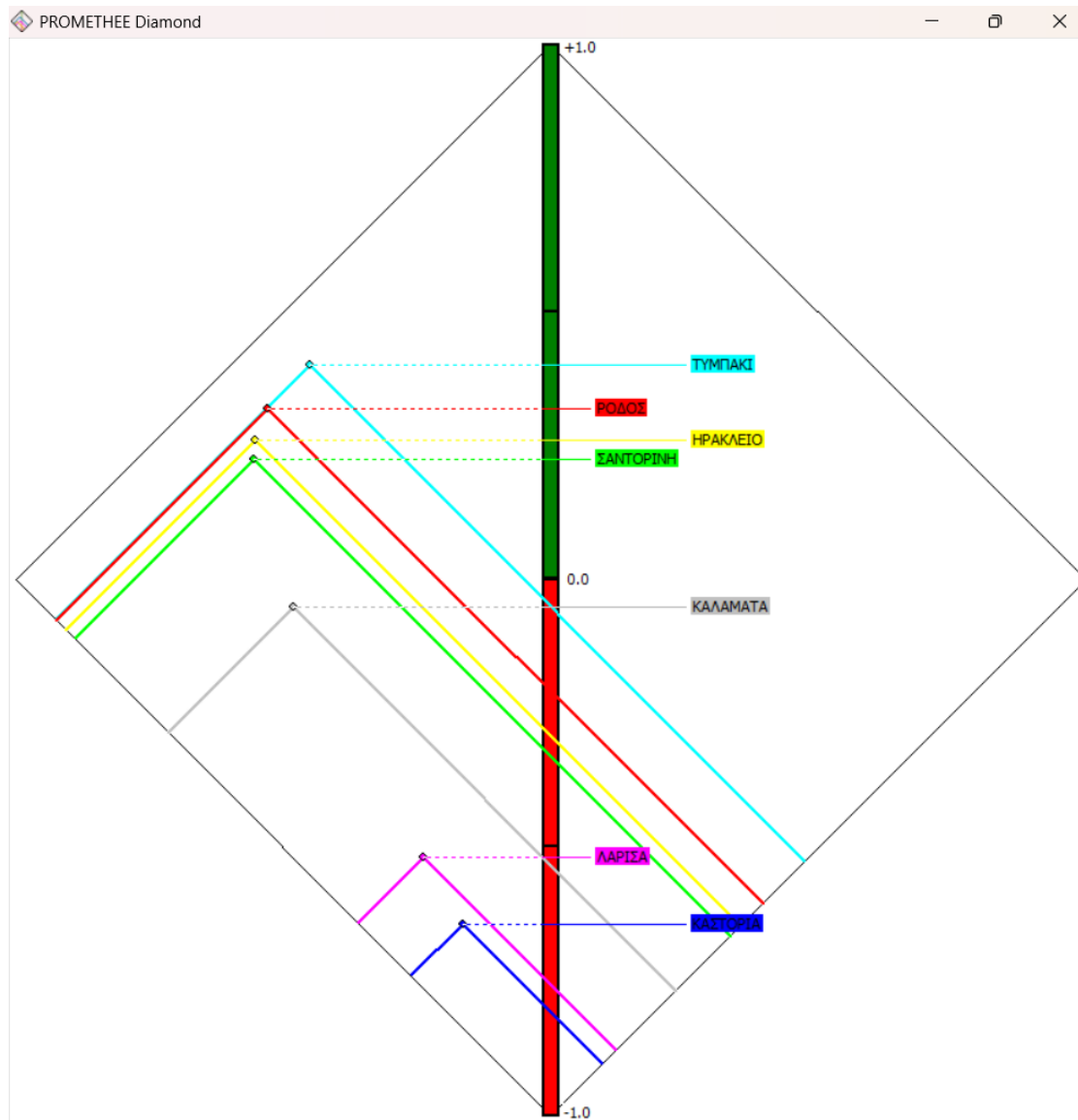
Εικόνα 82. Μερική κατάταξη σύμφωνα με την PROMETHEE I. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.

Από τη μερική κατάταξη της PROMETHEE I (εικόνα 82) προκύπτει ότι το Τυμπάκι παρουσιάζει μεγαλύτερη  $\Phi^+$  και μικρότερη  $\Phi^-$  από τη Ρόδο και συνεπώς υπερέχει έναντι αυτής. Το ίδιο ισχύει διαδοχικά και για τις υπόλοιπες πόλεις οδηγώντας στην κατάταξη: Τυμπάκι > Ρόδος > Ηράκλειο > Σαντορίνη > Καλαμάτα > Λάρισα > Καστοριά. Συνεπώς ήδη με εφαρμογή της PROMETHEE I έχει προκύψει η κατάταξη των περιοχών χωρίς αδυναμίες σύγκρισης. Η τελευταία διαπίστωση είναι εμφανής γραφικά από την έλλειψη τομών μεταξύ των γραμμών.

Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται στα γραφήματα που αφορούν την PROMETHEE II (εικόνα 82) και την PROMETHEE Diamond (εικόνα 83).

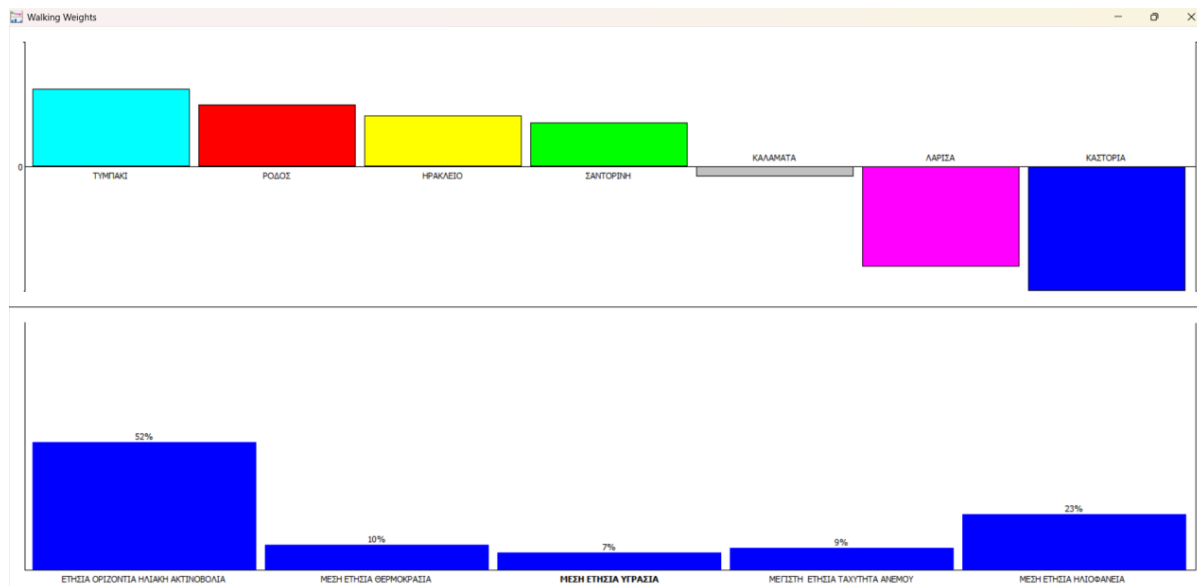


Εικόνα 83. Πλήρης κατάταξη σύμφωνα με την PROMETHEE II. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.



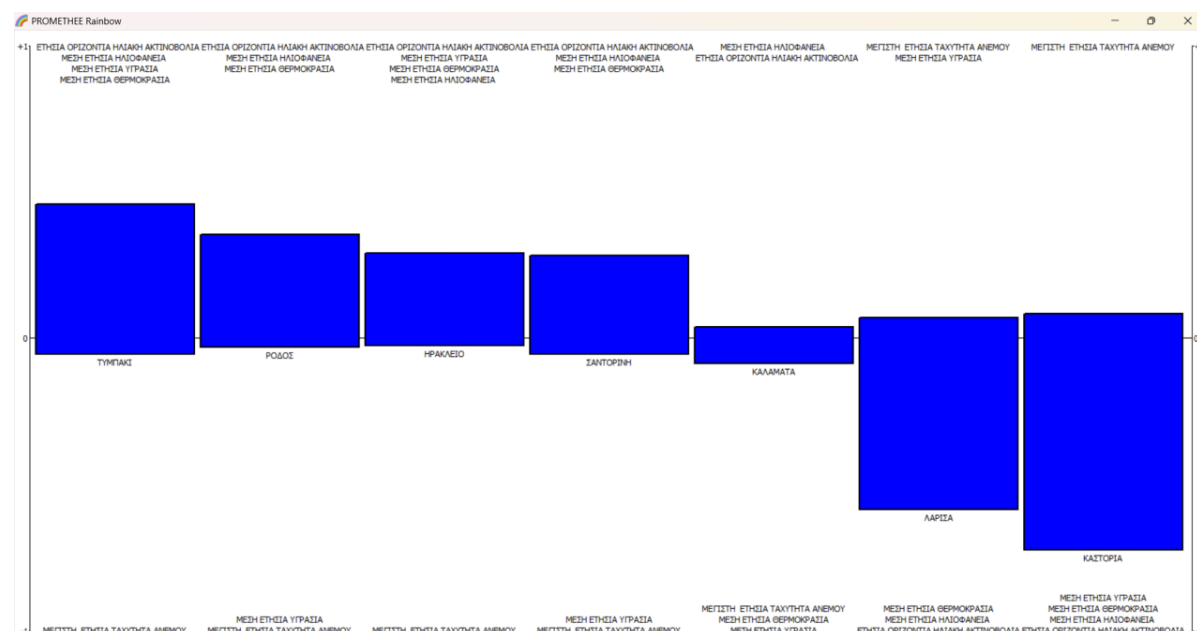
Εικόνα 84. Διάγραμμα PROMETHEE Diamond. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.

Ακολούθως παρατίθεται άποψη του πίνακα δυναμικής ανάλυσης βαρών με ορισμό της χρησιμοποιούμενης βαρύτητας.



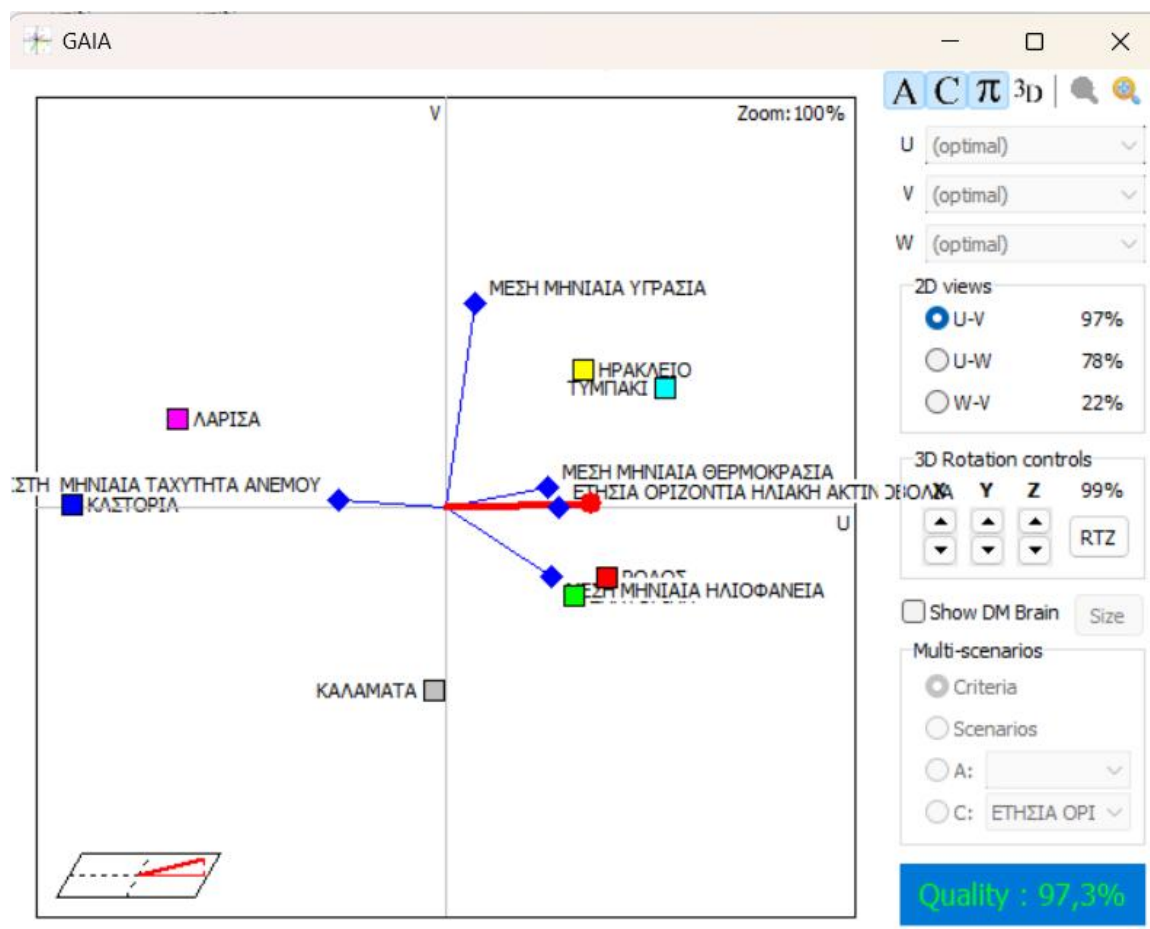
Εικόνα 85. Δυναμική Ανάλυση Βαρών (Walking Weights). Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.

Ακολούθως παρατίθεται η γραφική αναπαράσταση PROMETHEE Rainbow.



Εικόνα 86. Διάγραμμα PROMETHEE Rainbow. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.

Ακολουθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Gaia Analysis



Εικόνα 87. Ανάλυση GAIA. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.

Η ποιότητα της ανάλυσης είναι αξιόπιστη καθώς είναι άνω του 70% προσεγγίζοντας το 100%.

Στο διάγραμμα GAIA παρατηρείται ότι τα κριτήρια της ετήσιας οριζόντιας ακτινοβολίας, της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και της μέσης ετήσιας ηλιοφάνειας συγκλίνουν προς παρόμοια κατεύθυνση στο διάγραμμα, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ τους και κοινή συμβολή στην αξιολόγηση. Προς αυτή την κατεύθυνση τοποθετούνται πόλεις όπως το Τυμπάκι, το Ηράκλειο, η Ρόδος και η Σαντορίνη, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένες εναλλακτικές ευνοούνται από τα εν λόγω κριτήρια και παρουσιάζουν υψηλές επιδόσεις στο πλαίσιο της ανάλυσης.

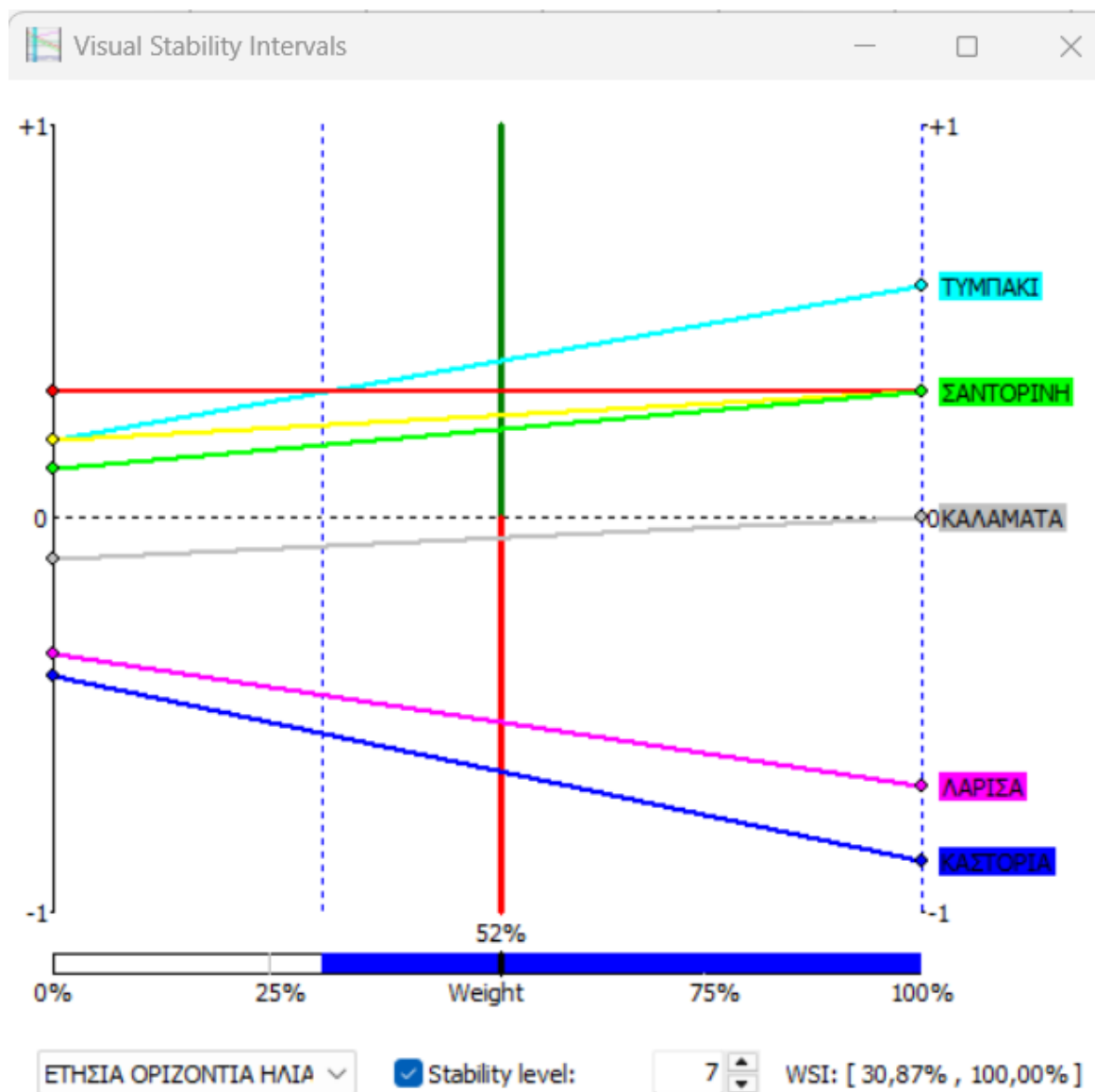
Αντίθετα, το κριτήριο της μέγιστης ετήσιας ταχύτητας ανέμου εμφανίζεται σε διαφορετική, σχεδόν αντίθετη κατεύθυνση, γεγονός που καταδεικνύει σύγκρουση με τα προαναφερθέντα κριτήρια. Προς αυτή την κατεύθυνση εντοπίζεται κυρίως η Καστοριά, η οποία

διαφοροποιείται σημαντικά από τις υπόλοιπες πόλεις και παρουσιάζει χαμηλότερη συνολική αξιολόγηση, καθώς δεν ευνοείται από τα κυρίαρχα κριτήρια της ανάλυσης.

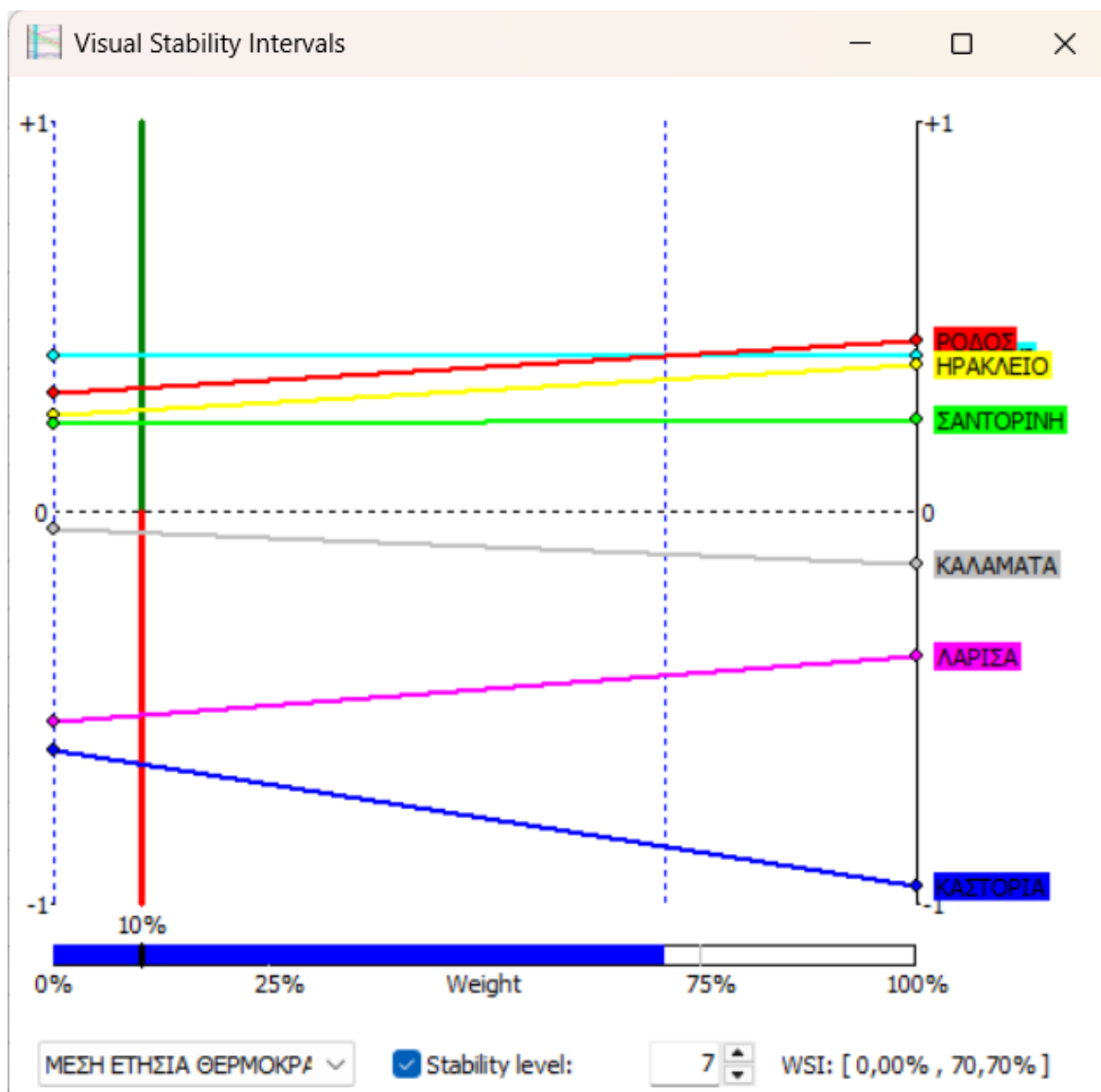
Η Λάρισα εμφανίζεται επίσης απομακρυσμένη από την κύρια ομάδα των «θετικών» κριτηρίων, υποδηλώνοντας ότι δεν επωφελείται στον ίδιο βαθμό από αυτά, ενώ η Καλαμάτα τοποθετείται κοντά στο κέντρο του διαγράμματος, γεγονός που φανερώνει πιο ισορροπημένη και ουδέτερη συμπεριφορά ως προς το σύνολο των κριτηρίων, χωρίς έντονη υπεροχή ή υστέρηση.

Συνολικά, το διάγραμμα δείχνει ότι η τελική κατάταξη καθορίζεται κυρίως από τα κριτήρια που σχετίζονται με την ηλιακή διαθεσιμότητα και τη θερμοκρασία, τα οποία ευνοούν σαφώς πόλεις όπως το Τυμπάκι, το Ηράκλειο, τη Ρόδο και τη Σαντορίνη, ενώ η ύπαρξη αντικρουόμενων κριτηρίων, όπως η ταχύτητα του ανέμου, εξηγεί τη χαμηλότερη επίδοση πόλεων όπως η Καστοριά.

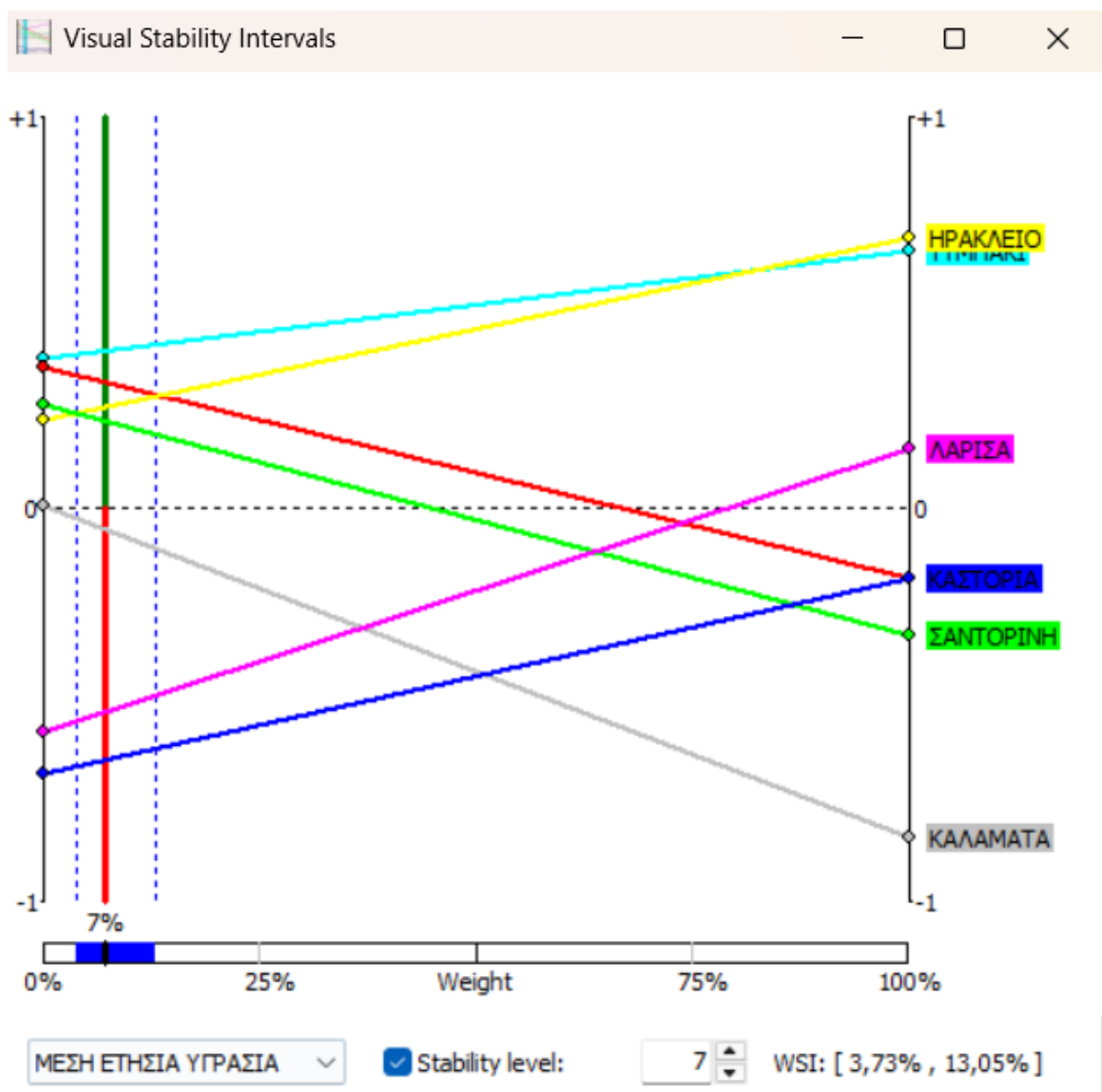
Ακολουθεί η παρουσίαση των διαγραμμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας για το σύνολο των κριτηρίων όπου προσδιορίζονται τα αντίστοιχα διαστήματα σταθερότητας.



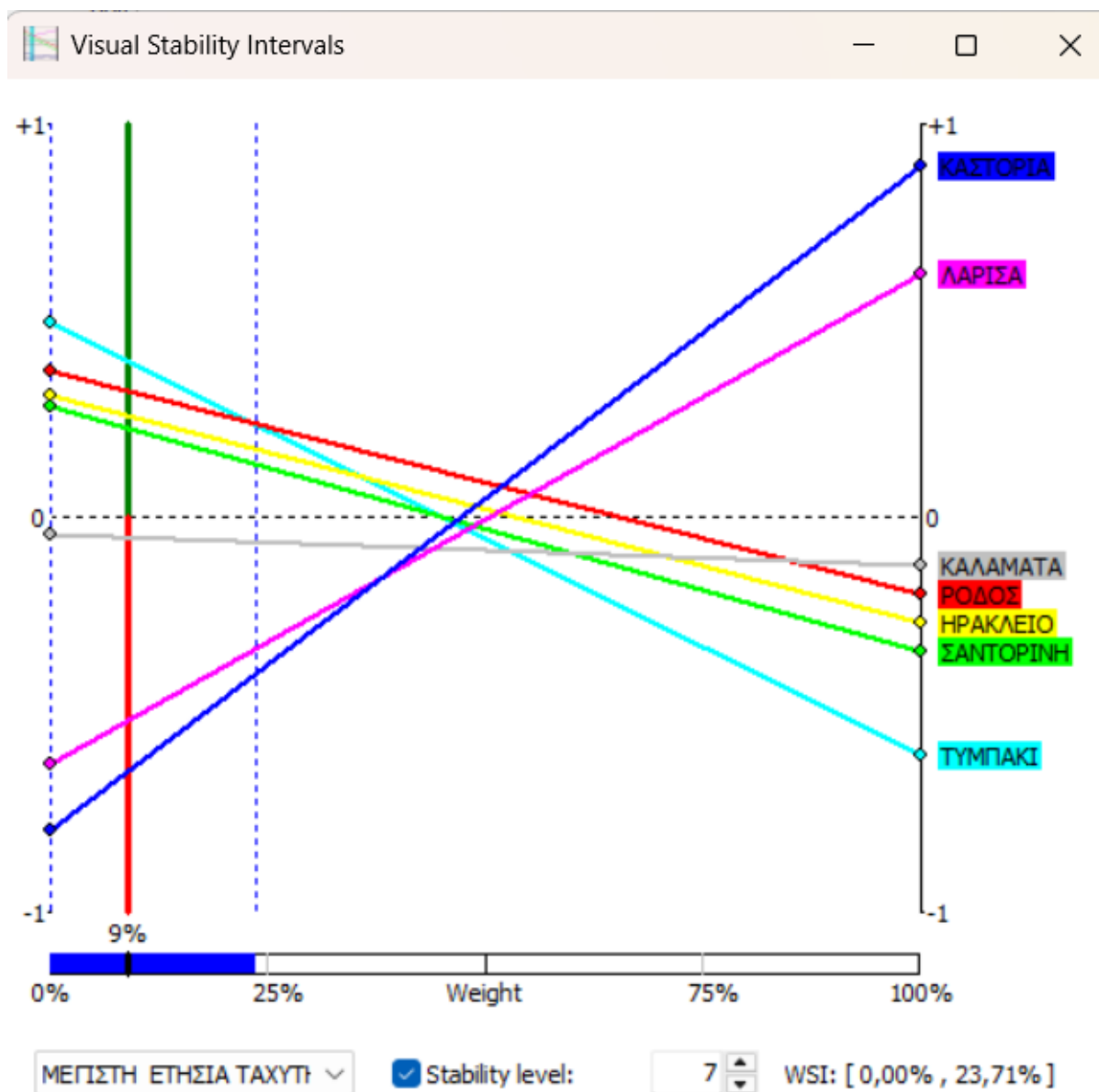
Εικόνα 88. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της ετήσιας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 30,87% , 100%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.



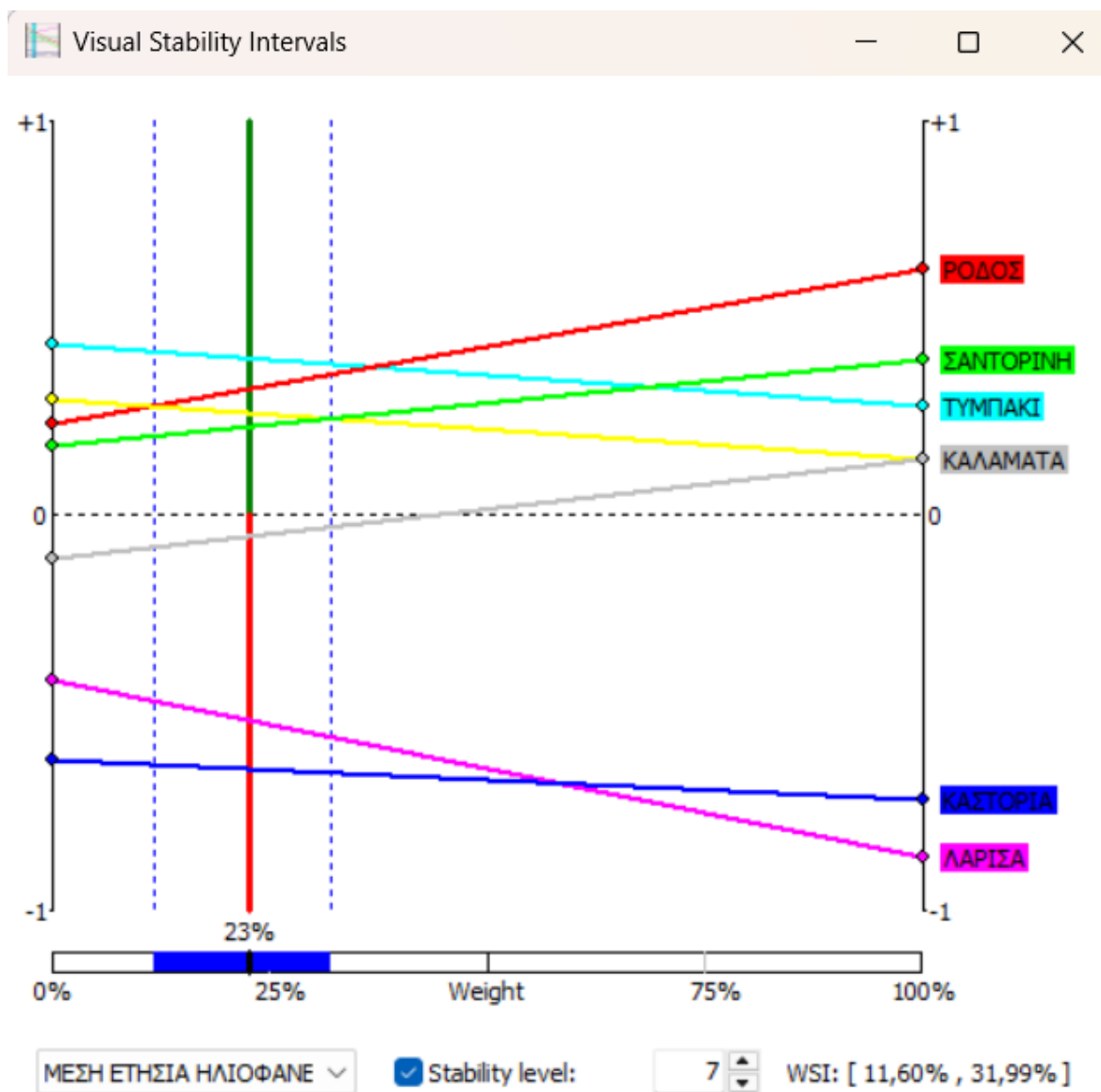
Εικόνα 89. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 70,70%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.



Εικόνα 90. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας υγρασίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 3,73% , 13,05%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.



Εικόνα 91. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέγιστης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 23,71%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.



Εικόνα 92. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέγιστης ετήσιας ηλιοφάνειας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 11,60% , 31,99%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα.

### 6.6.4 Επίλυση με συντελεστές βαρύτητας των Karadöl & Yildirim (2025)

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται το Main Window του λογισμικού Visual PROMETHEE όπου πραγματοποιείται η εισαγωγή, η διαχείριση και η επεξεργασία των δεδομένων του προβλήματος πολυκριτηριακής ανάλυσης

Visual PROMETHEE Academic - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ\_ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ Karadöl & Yildirim\_V SHAPE P.vpg (saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

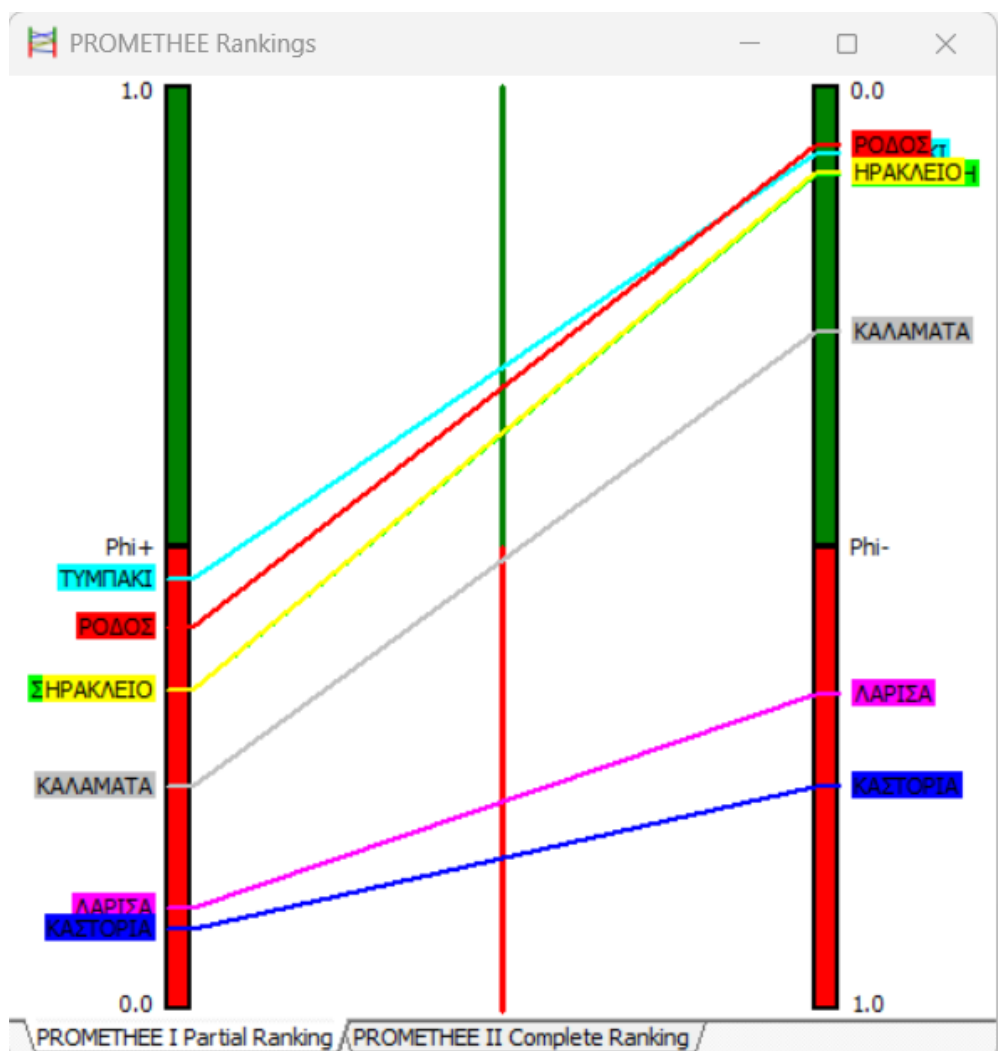
| Scenario1          | ΕΤΗΣΙΑ ΟΡΙ... | ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙ... | ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙ... | ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΤ... | ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙ... |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Unit               | unit          | unit          | unit          | unit          | unit          |
| Cluster/Group      | ◆             | ◆             | ◆             | ◆             | ◆             |
| <b>Preferences</b> |               |               |               |               |               |
| Min/Max            | max           | max           | min           | min           | max           |
| Weight             | 50,50         | 12,12         | 4,04          | 8,08          | 25,25         |
| Preference Fn.     | V-shape       | V-shape       | V-shape       | V-shape       | V-shape       |
| Thresholds         | absolute      | absolute      | absolute      | absolute      | absolute      |
| - Q: Indifference  | n/a           | n/a           | n/a           | n/a           | n/a           |
| - P: Preference    | 237,25        | 4,12          | 2,65          | 13,65         | 1,25          |
| - S: Gaussian      | n/a           | n/a           | n/a           | n/a           | n/a           |
| <b>Statistics</b>  |               |               |               |               |               |
| Minimum            | 1534,00       | 13,00         | 64,50         | 25,00         | 6,75          |
| Maximum            | 1899,00       | 19,33         | 68,58         | 46,00         | 8,67          |
| Average            | 1753,00       | 17,46         | 66,27         | 37,57         | 7,85          |
| Standard Dev.      | 123,39        | 2,13          | 1,33          | 6,82          | 0,65          |
| <b>Evaluations</b> |               |               |               |               |               |
| ✓ ΤΥΜΠΑΚΙ          | 1899,00       | 19,17         | 64,58         | 46,00         | 8,17          |
| ✓ ΡΟΔΟΣ            | 1826,00       | 19,33         | 66,67         | 40,00         | 8,67          |
| ✓ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ        | 1826,00       | 18,50         | 67,00         | 42,00         | 8,33          |
| ✓ ΗΡΑΚΛΕΙΟ         | 1826,00       | 19,08         | 64,50         | 41,00         | 8,00          |
| ✓ ΛΑΡΙΣΑ           | 1607,00       | 16,17         | 65,92         | 30,00         | 6,75          |
| ✓ ΚΑΛΑΜΑΤΑ         | 1753,00       | 17,00         | 68,58         | 39,00         | 8,00          |
| ✓ ΚΑΣΤΟΡΙΑ         | 1534,00       | 13,00         | 66,67         | 25,00         | 7,00          |

Εικόνα 93. Το βασικό περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Visual PROMETHEE για την εισαγωγή και διαχείριση δεδομένων επίλυσης. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της PROMETHEE I, με κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων σε μορφή πίνακα και σε μορφή γραφικής παράστασης.

| Rank | action    |  | Phi     | Phi+   | Phi-   |
|------|-----------|--|---------|--------|--------|
| 1    | ΤΥΜΠΑΚΙ   |  | 0,3951  | 0,4670 | 0,0719 |
| 2    | ΡΟΔΟΣ     |  | 0,3502  | 0,4131 | 0,0630 |
| 3    | ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ |  | 0,2508  | 0,3465 | 0,0957 |
| 4    | ΗΡΑΚΛΕΙΟ  |  | 0,2507  | 0,3449 | 0,0942 |
| 5    | ΚΑΛΑΜΑΤΑ  |  | -0,0230 | 0,2418 | 0,2648 |
| 6    | ΛΑΡΙΣΑ    |  | -0,5502 | 0,1096 | 0,6598 |
| 7    | ΚΑΣΤΟΡΙΑ  |  | -0,6735 | 0,0864 | 0,7599 |

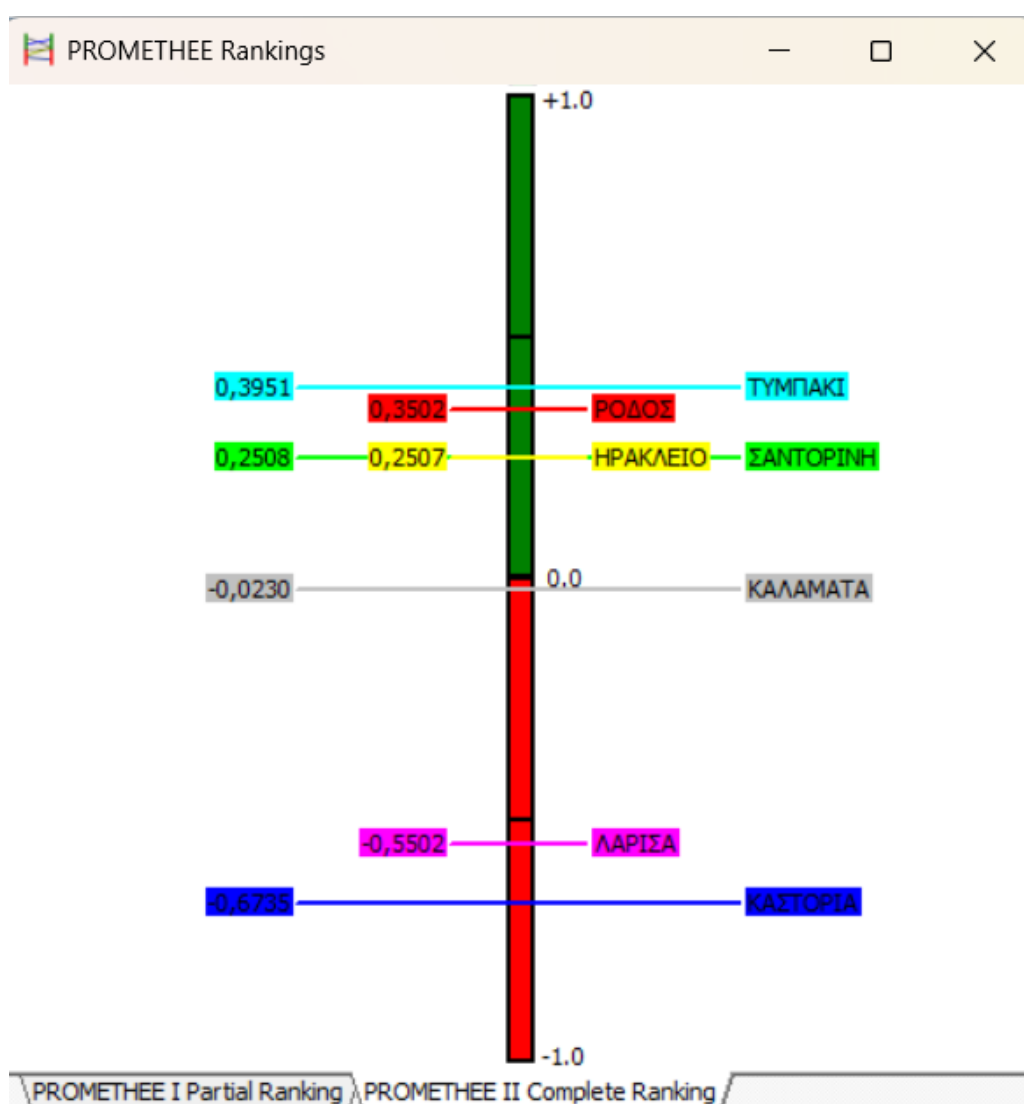
Εικόνα 94. Τιμές των ροών προτίμησης και τα αποτελέσματα της κατάταξης των εναλλακτικών. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.



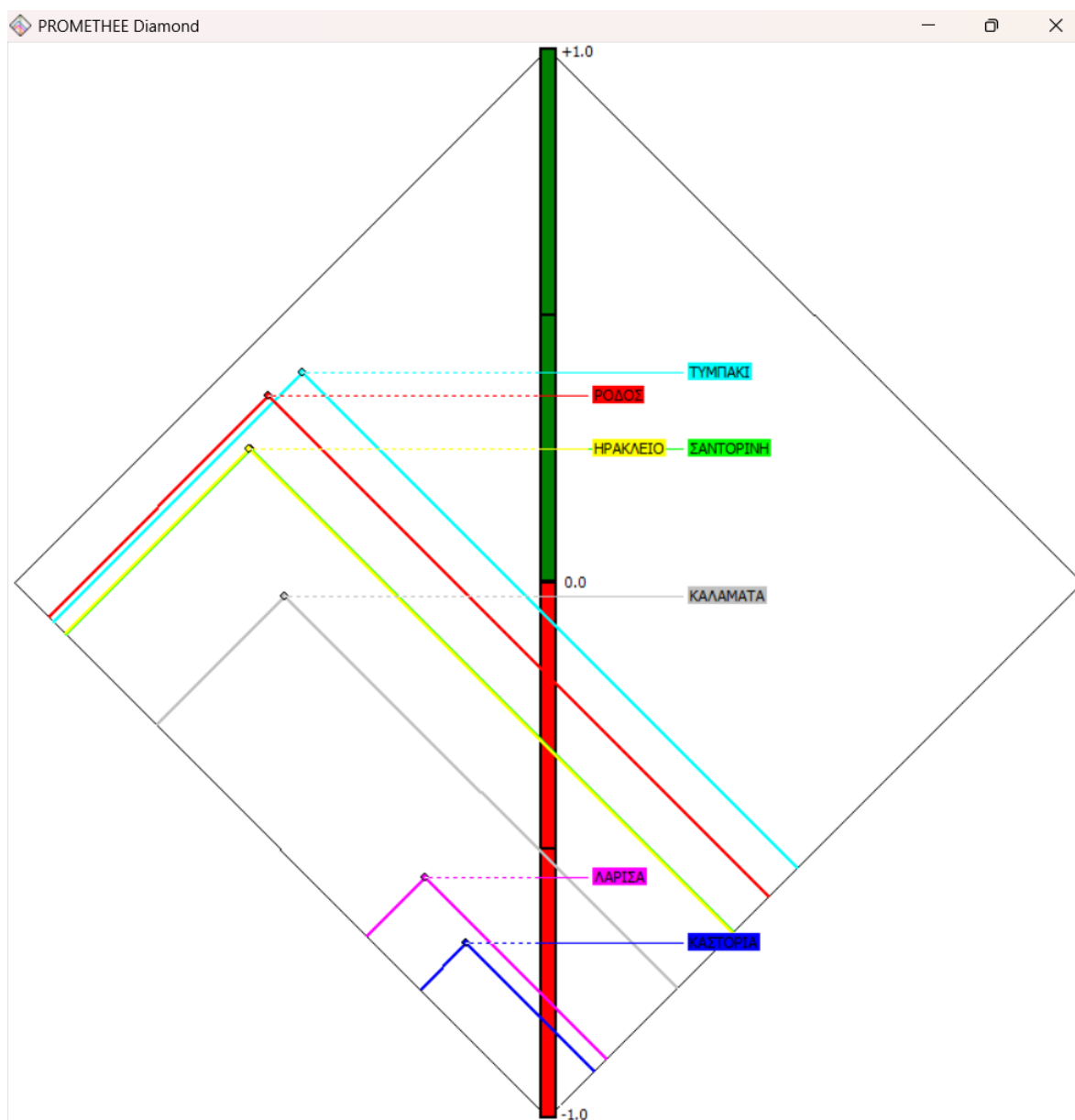
Εικόνα 95. Μερική κατάταξη σύμφωνα με την PROMETHEE I. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim

Από τη μερική κατάταξη της PROMETHEE I (εικόνα 82) προκύπτει ότι το Τυμπάκι παρουσιάζει μεγαλύτερη  $\Phi^+$  και μικρότερη  $\Phi^-$  από τη Ρόδο και συνεπώς υπερέχει έναντι αυτής. Το ίδιο ισχύει διαδοχικά και για τις υπόλοιπες πόλεις οδηγώντας στην κατάταξη: Τυμπάκι > Ρόδος > Σαντορίνη > Ηράκλειο > Καλαμάτα > Λάρισα > Καστοριά. Συνεπώς ήδη με εφαρμογή της PROMETHEE I έχει προκύψει η κατάταξη των περιοχών χωρίς αδυναμίες σύγκρισης. Η τελευταία διαπίστωση είναι εμφανής γραφικά από την έλλειψη τομών μεταξύ των γραμμών.

Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται στα γραφήματα που αφορούν την PROMETHEE II (εικόνα 96) και την PROMETHEE Diamond (εικόνα 97)

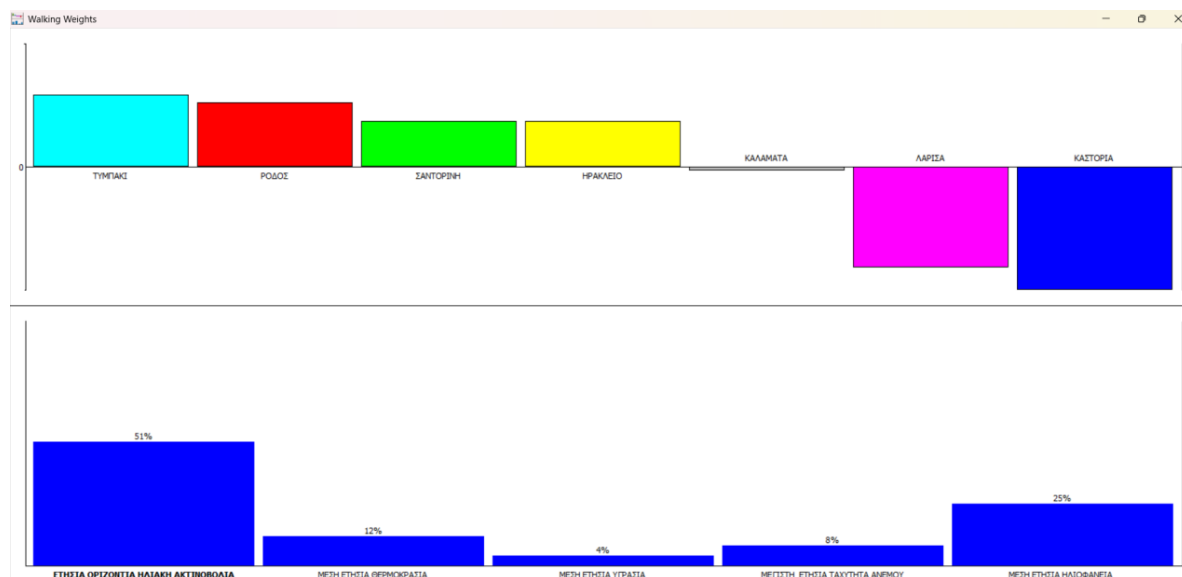


Εικόνα 96. Πλήρης κατάταξη σύμφωνα με την PROMETHEE II. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.



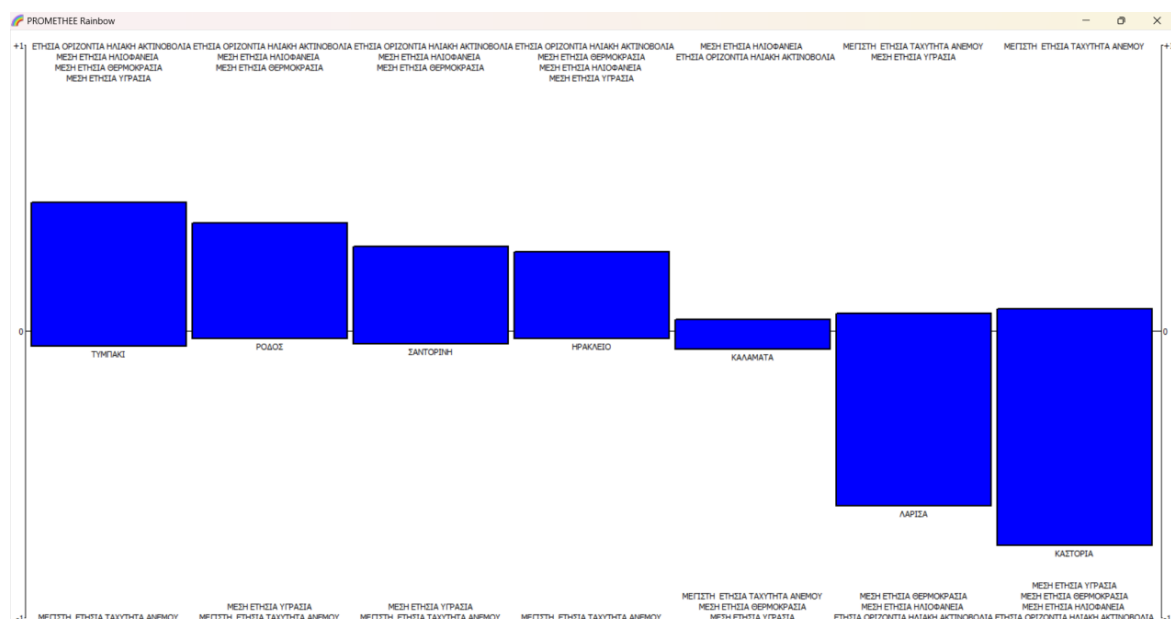
Εικόνα 97. Διάγραμμα PROMETHEE Diamond. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim

Ακολούθως παρατίθεται άποψη του πίνακα δυναμικής ανάλυσης βαρών με ορισμό της χρησιμοποιούμενης βαρύτητας.



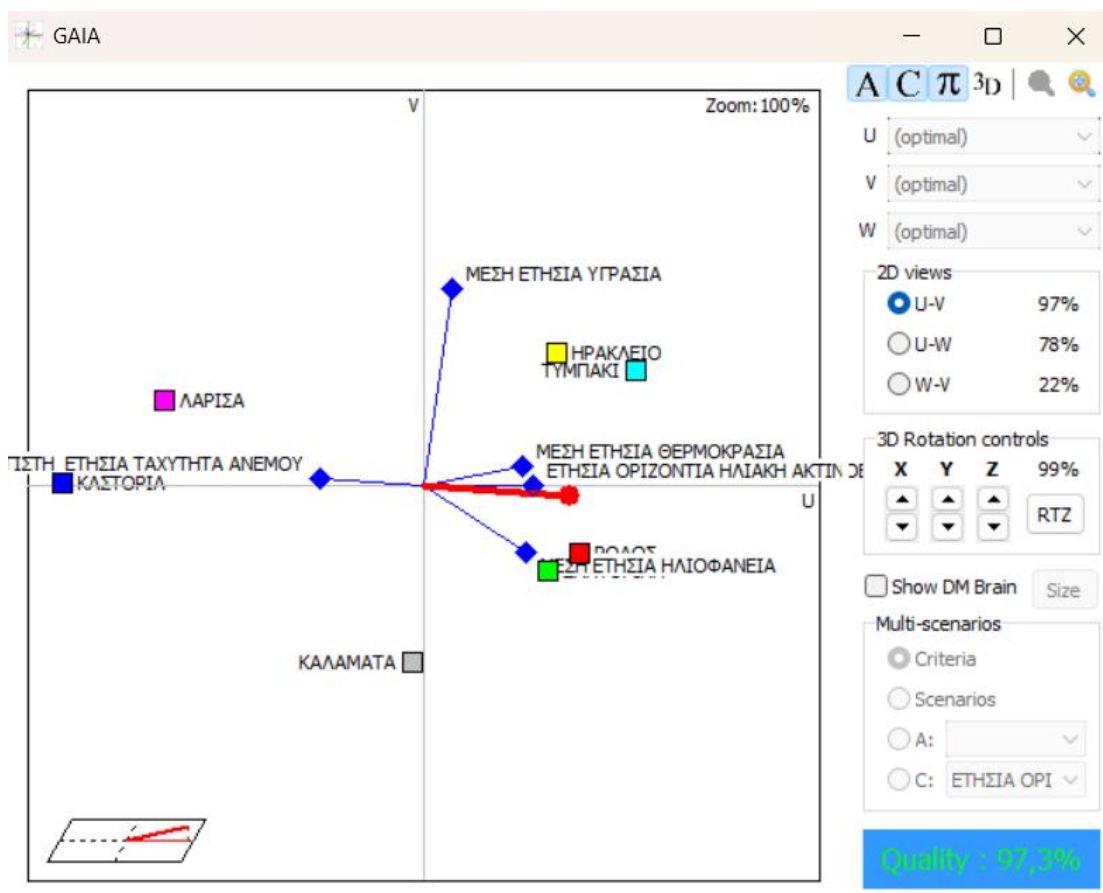
Εικόνα 98. Δυναμική Ανάλυση Βαρών (Walking Weights). Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim

Ακολούθως παρατίθεται η γραφική αναπαράσταση PROMETHEE Rainbow.



Εικόνα 99. Διάγραμμα PROMETHEE Rainbow. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim

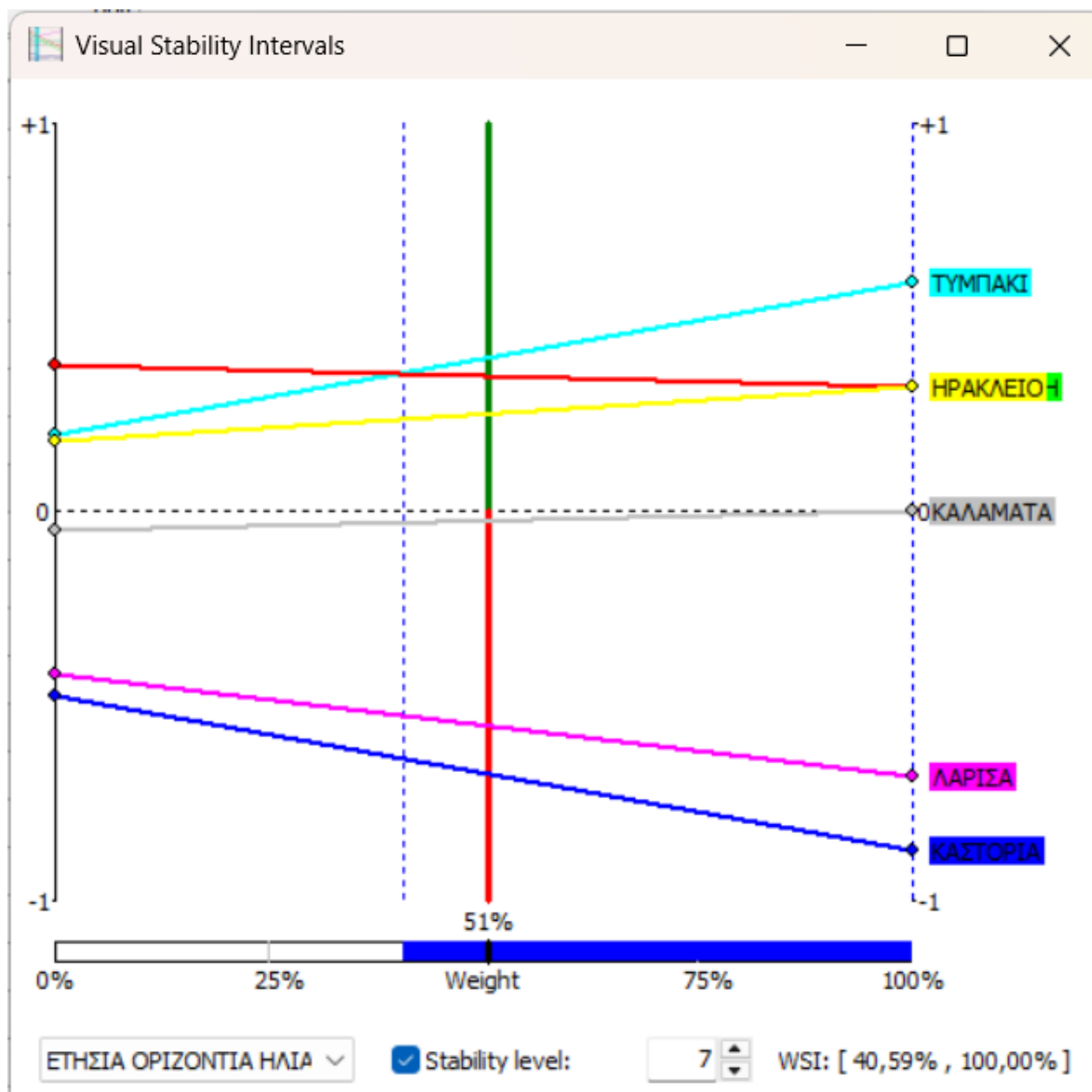
Ακολουθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Gaia Analysis



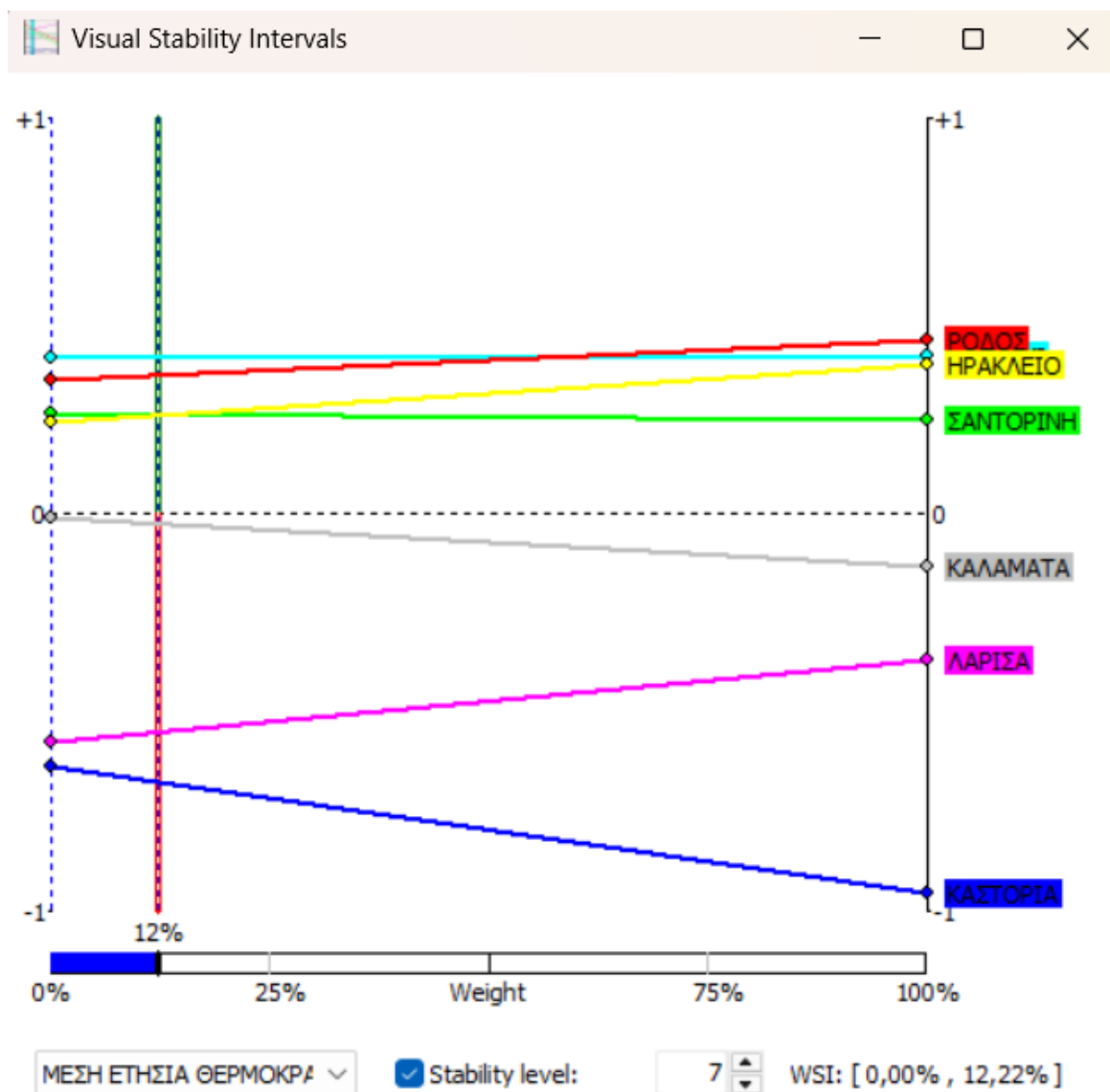
Εικόνα 100. Ανάλυση GAIA. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.

Η ποιότητα της ανάλυσης είναι αξιόπιστη καθώς είναι άνω του 70% προσεγγίζοντας το 100% . Ταυτόχρονα , ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με την ανάλυση βάση κριτηρίων βιβλιογραφικής έρευνας.

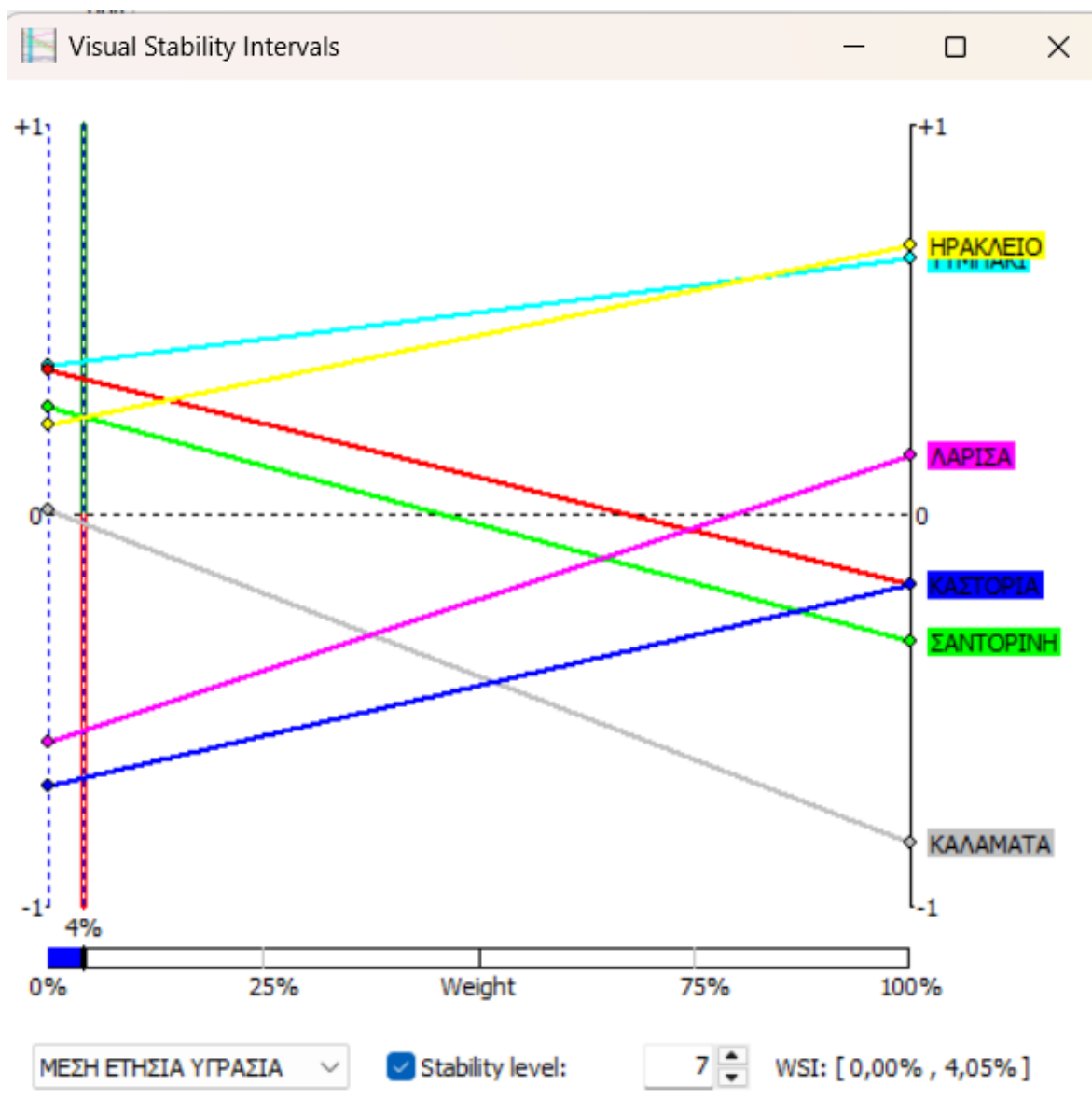
Ακολουθεί η παρουσίαση των διαγραμμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας για το σύνολο των κριτηρίων όπου προσδιορίζονται τα αντίστοιχα διαστήματα σταθερότητας.



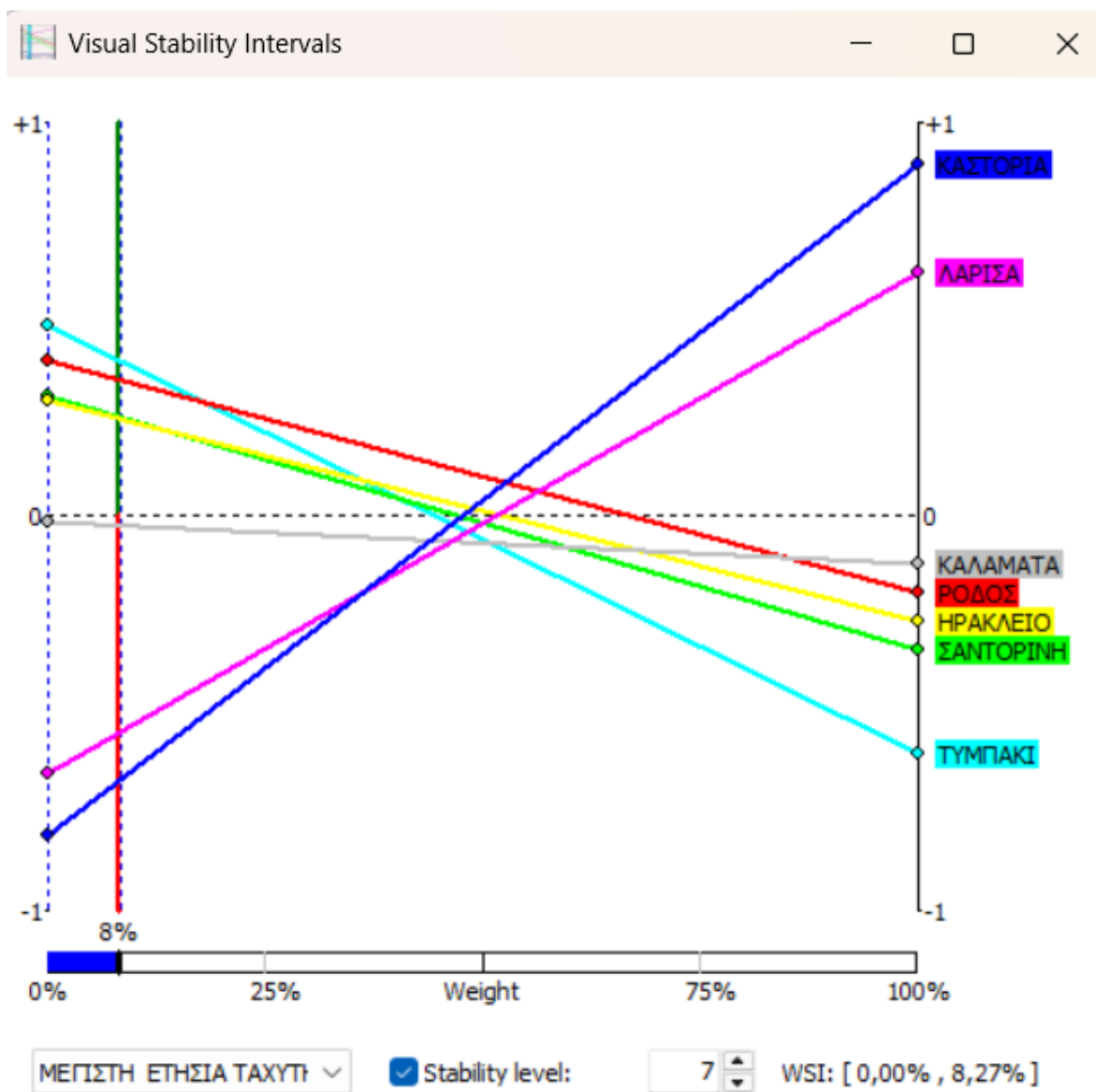
Εικόνα 101. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της ετήσιας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 40,59% , 100%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim



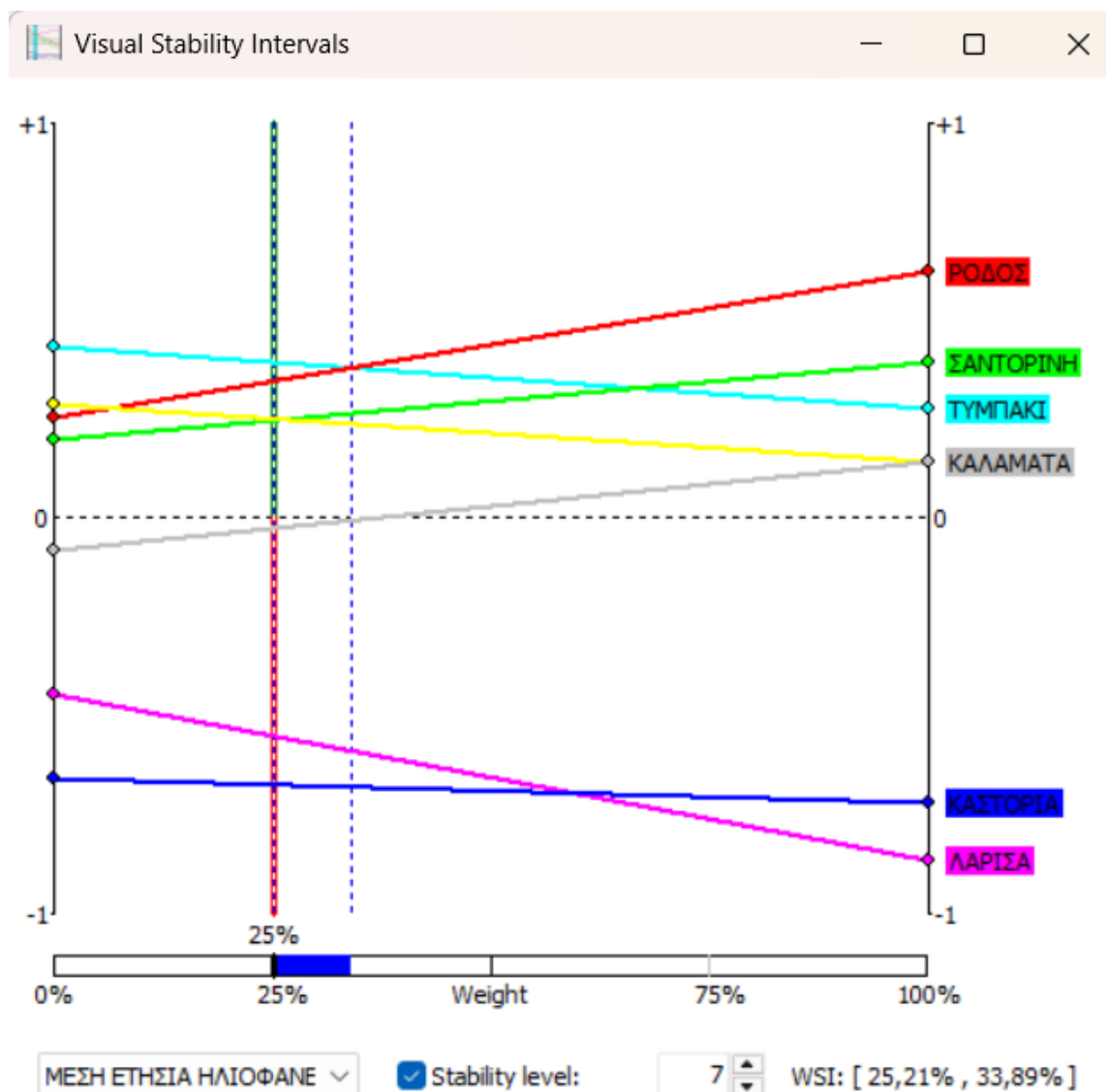
Εικόνα 102. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 12,22%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim



Εικόνα 103. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας υγρασίας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 4,05%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.



Εικόνα 104. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέγιστης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 0% , 8,27%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim



Εικόνα 105. Ανάλυση ευαισθησίας του κριτηρίου της μέσης ετήσιας ηλιοφάνειας και προσδιορισμός του διαστήματος σταθερότητας [WSI: 25,21% , 33,89%]. Εφαρμογή συντελεστών βαρύτητας σύμφωνα με τους Karadöl & Yildirim.

| <b><u>Κατάταξη εξεταζόμενων θέσεων</u></b> |                                             |                                                       |                                                                |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>A/A</b>                                 | <b>Δυναμικό παραγωγής ενέργειας από Φ/Β</b> | <b>Επίλυση με PROMETHEE (Βαρύτητες βιβλιογραφίας)</b> | <b>Επίλυση με PROMETHEE (Βαρύτητες Karadöl &amp; Yildirim)</b> |
| 1                                          | Τυμπάκι                                     | Τυμπάκι                                               | Τυμπάκι                                                        |
| 2                                          | Ρόδος                                       | Ρόδος                                                 | Ρόδος                                                          |
| 3                                          | Σαντορίνη                                   | Ηράκλειο                                              | Σαντορίνη                                                      |
| 4                                          | Ηράκλειο                                    | Σαντορίνη                                             | Ηράκλειο                                                       |
| 5                                          | Καλαμάτα                                    | Καλαμάτα                                              | Καλαμάτα                                                       |
| 6                                          | Λάρισα                                      | Λάρισα                                                | Λάρισα                                                         |
| 7                                          | Καστοριά                                    | Καστοριά                                              | Καστοριά                                                       |

Εικόνα 106. Σειρά κατάταξης εξεταζόμενων θέσεων

## 7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - Συμπεράσματα

### 7.1 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα κατάταξης που προκύπτουν από GIS χάρτες δυναμικού παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την καταλληλότητα επτά διαφορετικών τοποθεσιών για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πάρκων με αποκλειστικό κριτήριο τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά τους. Οι εξεταζόμενες θέσεις επιλέχθηκαν πλησίον μετεωρολογικών σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και συγκεκριμένα στις περιοχές Τυμπακίου, Ρόδου, Σαντορίνης, Ηρακλείου, Καλαμάτας, Λάρισας και Καστοριάς. Η επιλογή των θέσεων βασίστηκε αφενός στη διαθεσιμότητα αξιόπιστων και πλήρων μετεωρολογικών δεδομένων για το σύνολο των εξεταζόμενων παραμέτρων και αφετέρου στη διαφοροποίηση του δυναμικού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα που παρουσιάζουν οι περιοχές αυτές. Στο πλαίσιο της ανάλυσης θεωρήθηκε ότι όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες που επηρεάζουν τη χωροθέτηση ενός φωτοβολταϊκού έργου, όπως τεχνικοί, οικονομικοί, χωροταξικοί και θεσμικοί, είναι κοινοί για όλες τις εξεταζόμενες θέσεις, ώστε να απομονωθεί η επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων.

Για την αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων εφαρμόστηκε πολυκριτηριακή ανάλυση και ειδικότερα η μέθοδος PROMETHEE. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε η επίλυση του προβλήματος με χρήση συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν από την επεξεργασία βιβλιογραφικών δεδομένων στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης. Στο δεύτερο στάδιο επαναλήφθηκαν οι υπολογισμοί χρησιμοποιώντας τους συντελεστές βαρύτητας που προτείνονται στη βιβλιογραφία από τους Karadöl & Yildirim (2025). Στο τρίτο στάδιο τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω αναλύσεων συγκρίθηκαν με την κατάταξη που προκύπτει από την εκτίμηση του δυναμικού παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας, όπως αυτό αποτυπώνεται στους χάρτες ηλιακού δυναμικού της πλατφόρμας SolarGIS.

Η αξιολόγηση βάσει των χαρτών ηλιακού δυναμικού αποτυπώνει το θεωρητικό δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα και βασίζεται κυρίως σε παραμέτρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρέχει μια αξιόπιστη εκτίμηση του ενεργειακού δυναμικού μιας περιοχής, ωστόσο δεν λαμβάνει υπόψη ορισμένες μετεωρολογικές παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν την πραγματική απόδοση ή το κόστος υλοποίησης

ενός φωτοβολταϊκού έργου. Ενδεικτικά, δεν αξιολογείται άμεσα η επίδραση της σχετικής υγρασίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ούτε η επίδραση του ανέμου, ο οποίος σε χαμηλές ταχύτητες μπορεί να συμβάλλει θετικά μέσω της ψύξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ σε υψηλές ταχύτητες ενδέχεται να αυξήσει τις απαιτήσεις στατικής επάρκειας και κατ' επέκταση το κατασκευαστικό κόστος. Επιπλέον, η μεταβλητότητα της ηλιοφάνειας, αν και ενσωματώνεται έμμεσα στο εκτιμώμενο ενεργειακό δυναμικό, δεν εξετάζεται ως ανεξάρτητη παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει τη δυναμική λειτουργία του συστήματος, τις ταχείες διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος, τον σχεδιασμό των μετατροπέων ισχύος (inverters) και τη σταθερότητα τροφοδοσίας του ηλεκτρικού δικτύου.

Στην παρούσα εργασία η καταλληλότητα των θέσεων αξιολογήθηκε μέσω της μεθόδου PROMETHEE λαμβάνοντας υπόψη πέντε βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους: την ετήσια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία, τη μέση ετήσια θερμοκρασία, τη μέση ετήσια σχετική υγρασία, τη μέγιστη ταχύτητα ανέμου και τη μέση ετήσια ηλιοφάνεια. Στην αντίστοιχη ανάλυση που βασίζεται στη μελέτη των Karadöl & Yildirim χρησιμοποιείται η μέση ετήσια νέφωση αντί της ηλιοφάνειας. Οι δύο αυτές παράμετροι θεωρείται ότι περιγράφουν ουσιαστικά το ίδιο φαινόμενο, με τη διαφορά ότι η ηλιοφάνεια αξιολογείται ως παράγοντας με θετική επίδραση στην καταλληλότητα μιας θέσης, ενώ η νέφωση ως παράγοντας με αρνητική επίδραση.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση μεταξύ της κατάταξης που προκύπτει από τους χάρτες ηλιακού δυναμικού και της κατάταξης που προκύπτει από τη μέθοδο PROMETHEE όταν χρησιμοποιούνται οι συντελεστές βαρύτητας της μελέτης των Karadöl & Yildirim. Συγκεκριμένα, η τελική κατάταξη των θέσεων διαμορφώνεται ως εξής: 1) Τυμπάκι, 2) Ρόδος, 3) Σαντορίνη, 4) Ηράκλειο, 5) Καλαμάτα, 6) Λάρισα και 7) Καστοριά. Αντίθετα, όταν εφαρμόζονται οι συντελεστές βαρύτητας που προέκυψαν από την επεξεργασία της βιβλιογραφίας στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση μεταξύ της τρίτης και της τέταρτης θέσης. Συγκεκριμένα, στην τρίτη θέση κατατάσσεται το Ηράκλειο με τιμή καθαρής ροής προτίμησης  $\Phi$  ίση με 0,2614 και στην τέταρτη θέση η Σαντορίνη με τιμή  $\Phi$  ίση με 0,2262. Αντίθετα, με βάση τους συντελεστές βαρύτητας των Karadöl & Yildirim, η Σαντορίνη κατατάσσεται τρίτη με τιμή  $\Phi$  ίση με 0,2508 και το Ηράκλειο τέταρτο με τιμή  $\Phi$  ίση με 0,2507.

Η πολύ μικρή διαφορά στην τιμή της καθαρής ροής προτίμησης μεταξύ της Σαντορίνης και του Ηρακλείου στην ανάλυση που βασίζεται στους συντελεστές της βιβλιογραφίας υποδηλώνει ότι οι δύο θέσεις εμφανίζουν σχεδόν ισοδύναμο επίπεδο καταλληλότητας με βάση τα εξεταζόμενα κριτήρια. Στη μέθοδο PROMETHEE η καθαρή ροή ( $\Phi$ ) εκφράζει τη

συνολική υπεροχή μιας εναλλακτικής έναντι των υπολοίπων, συνδυάζοντας τις θετικές και αρνητικές ροές προτίμησης. Συνεπώς, μικρές διαφορές στις τιμές της υποδηλώνουν ότι η τελική κατάταξη μπορεί να επηρεαστεί σχετικά εύκολα από μικρές μεταβολές είτε στους συντελεστές βαρύτητας είτε στα δεδομένα εισόδου. Το γεγονός αυτό εξηγεί και τη διαφοροποίηση που προκύπτει μεταξύ των δύο σεναρίων ανάλυσης που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

Η σύγκριση των συντελεστών βαρύτητας που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη με εκείνους της μελέτης των Karadöl & Yildirim δείχνει ότι και στις δύο περιπτώσεις η ηλιακή ακτινοβολία αναγνωρίζεται ως ο σημαντικότερος παράγοντας καταλληλότητας για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων, με συντελεστή βαρύτητας που υπερβαίνει το 50%. Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία η βαρύτητα της ηλιακής ακτινοβολίας προσδιορίστηκε στο 51,50%, ενώ στη μελέτη των Karadöl & Yildirim στο 50,50%. Ως δεύτερη σημαντικότερη παράμετρος αναδεικνύεται η ηλιοφάνεια ή αντίστοιχα η νέφωση, με συντελεστή βαρύτητας 22,53% στην παρούσα μελέτη και 25,25% στη βιβλιογραφική αναφορά. Οι παράμετροι της θερμοκρασίας και του ανέμου εμφανίζουν μικρότερες αλλά συγκρίσιμες τιμές μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. Αντίθετα, η σχετική υγρασία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ποσοστιαία απόκλιση, καθώς στην παρούσα εργασία αποδίδεται βαρύτητα 7,09% έναντι 4,04% στη μελέτη των Karadöl & Yildirim. Παρά την υψηλή ποσοστιαία διαφοροποίηση, η συγκεκριμένη παράμετρος εξακολουθεί να εμφανίζει τη μικρότερη απόλυτη βαρύτητα μεταξύ των εξεταζόμενων κριτηρίων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταδεικνύουν ότι η κατάταξη των εξεταζόμενων θέσεων παραμένει σε μεγάλο βαθμό σταθερή ακόμη και όταν εφαρμόζονται διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητικό βαθμό ανθεκτικότητας. Παράλληλα, αναδεικνύεται η σημασία της πολυκριτηριακής ανάλυσης ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων στη διαδικασία χωροθέτησης ενεργειακών έργων, καθώς επιτρέπει τη συστηματική αξιολόγηση πολλαπλών παραμέτρων και τη συγκριτική ανάλυση εναλλακτικών επιλογών.

Τέλος, παρότι η παρούσα εργασία εστιάζει αποκλειστικά σε μετεωρολογικά κριτήρια, καθίσταται σαφές ότι η βέλτιστη προσέγγιση για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων θα πρέπει να ενσωματώνει ένα ευρύτερο σύνολο παραγόντων, όπως τεχνικοοικονομικές, χωροταξικές, περιβαλλοντικές και θεσμικές παραμέτρους. Οι μετεωρολογικές συνθήκες αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαστασιολόγηση, την κατασκευή και τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις η διαθεσιμότητα πλήρων και αξιόπιστων

μετεωρολογικών δεδομένων παραμένει περιορισμένη, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα σημαντική την αξιοποίηση οργανωμένων βάσεων δεδομένων και την ανάπτυξη ολοκληρωμένων μεθοδολογιών αξιολόγησης για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

## 7.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας

Η παρούσα μελέτη εστίασε στο πρόβλημα επιλογής κατάλληλης τοποθεσίας για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάρκων, δίνοντας έμφαση σε μετεωρολογικές παραμέτρους. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκαν η ετήσια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{kWh/m}^2$ ), η μέση ετήσια θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ), η μέση ετήσια υγρασία (%), η μέγιστη ετήσια ταχύτητα ανέμου ( $\text{m/s}$ ) και η μέση ετήσια ηλιοφάνεια ( $\text{hrs}$ ).

Μέσω της βιβλιογραφικής επισκόπησης διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων προσεγγίζεται με σημαντικό κατακερματισμό, τόσο ως προς την επιλογή των κριτηρίων όσο και ως προς τη βαρύτητά τους. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία μπορούν να ομαδοποιηθούν στις εξής βασικές κατηγορίες:

- **Μετεωρολογικά κριτήρια**, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια, η ταχύτητα ανέμου και η υγρασία
- **Οικονομικά κριτήρια**, όπως το κόστος επένδυσης, το λειτουργικό κόστος, η μέση τιμή πώλησης ενέργειας, η διάρκεια ζωής του έργου και το κόστος δανεισμού
- **Κριτήρια τοποθεσίας**, όπως η απόσταση από δίκτυα μεταφοράς ενέργειας, οι χρήσεις γης, η απόσταση από οικιστικές περιοχές, ο προσανατολισμός, η κλίση, το υψόμετρο, η προσβασιμότητα και οι σκιάσεις
- **Κοινωνικά κριτήρια**, όπως ο πληθυσμός και η πυκνότητα πληθυσμού

Η ανάλυση επιμέρους μελετών ανέδειξε ότι τα μετεωρολογικά κριτήρια χρησιμοποιούνται με διαφορετικούς συνδυασμούς και βαρύτητες. Ειδικότερα:

- Η μελέτη των Yilmaz et al. (2024) εξετάζει τέσσερα μετεωρολογικά κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία, νεφοκάλυψη, πυκνότητα υδρατμών, θερμοκρασία) με συνολική βαρύτητα 74,97%.
- Η μελέτη των Farnaz et al. (2025) λαμβάνει υπόψη δύο κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία) με συνολική βαρύτητα 45%.

- Η μελέτη των Al Awadhi et al. (2025) περιλαμβάνει πέντε κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου, βροχοπτώσεις, υγρασία, θερμοκρασία) με συνολική βαρύτητα 40,50%.
- Η μελέτη των Zambrano et al. (2021) εξετάζει δύο κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία) με συνολική βαρύτητα 43,90%.
- Η μελέτη του Gökler (2025) λαμβάνει υπόψη δύο κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου) με συνολική βαρύτητα 46,70%.
- Η μελέτη των Hooshangi et al. (2023) εξετάζει τέσσερα κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, ηλιοφάνεια, βροχόπτωση) με συνολική βαρύτητα 36,70%.
- Η μελέτη των Elboshy et al. (2022) περιλαμβάνει τρία κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, νέφωση) με συνολική βαρύτητα 52,70%.

Ανάλογος κατακερματισμός παρατηρείται και στις υπόλοιπες ομάδες κριτηρίων, γεγονός που υποδηλώνει την απουσία ενός ενιαίου και συστηματικού πλαισίου αξιολόγησης.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτουν σημαντικές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Σε πρώτο επίπεδο, κρίνεται αναγκαία μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του προβλήματος χωροθέτησης φωτοβολταϊκών πάρκων, η οποία θα καταγράφει συστηματικά τόσο τις βασικές ομάδες κριτηρίων όσο και τα επιμέρους υποκριτήρια κάθε ομάδας. Σε δεύτερο επίπεδο, απαιτείται η ανάπτυξη ενός ενιαίου πλαισίου προσδιορισμού των βαρών, τόσο σε επίπεδο ομάδων κριτηρίων όσο και σε επίπεδο υποκριτηρίων. Τέλος, σε τρίτο επίπεδο, προτείνεται η διαμόρφωση μεθοδολογίας δυναμικής αναπροσαρμογής των βαρών, ιδίως στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για συγκεκριμένα κριτήρια ή ομάδες κριτηρίων.

## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- García-Lillo, F., Sánchez-García, E., Marco-Lajara, B., & Seva-Larrosa, P. (2023). *Renewable energies and sustainable development: A bibliometric overview*. *Energies*, 16(3), 1211. <https://doi.org/10.3390/en16031211>
- Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A Review of Renewable Energy Options, Applications, Facilitating Technologies and Recent Developments. *European Journal of Sustainable Development Research*, 4(4), em0138. <https://doi.org/10.29333/ejosdr/8432>
- Zhao, Y. (2025). *A review of renewable energy and power system integration*. *Applied and Computational Engineering*, 126, 20092. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20092>
- Vodapally, S. N., & Ali, M. H. (2023). *A comprehensive review of solar photovoltaic (PV) technologies, architecture, and its applications to improved efficiency*. *Energies*, 16(1), 319. <https://doi.org/10.3390/en16010319>
- Al-Ezzi, A. S. (2022). *Photovoltaic Solar Cells: A Review*. *Journal of [open access journal]*, 5(4), 67. (MDPI / open access). <https://www.mdpi.com/2571-5577/5/4/67>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2022). *Understanding Solar Photovoltaic System Performance*. U.S. Department of Energy. (Open report). PDF: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/understanding-solar-photo-voltaic-system-performance.pdf>
- Franco, M. A. (2021). *A Systematic Literature Review of the Solar Photovoltaic Value Chain for a Circular Economy*. *Sustainability*, 13(17), 9615. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9615>. MDPI
- Lazaroiu, A. C., et al. (2023). *A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality*. *Sustainability*, 15(23), 16297. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/23/16297>
- Dada, M., et al. (2023). *Recent advances in solar photovoltaic materials and systems for energy storage applications: a review*. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. <https://bjbas.springeropen.com/articles/10.1186/s43088-023-00405-5>

Spyridonidou, S., & Vagiona, D. G. (2023). *A systematic review of site-selection procedures of PV and CSP technologies*. *Energy Reports*, 9, 2947–2979. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.132>

Liang, L., Wang, X., Zhang, X., Jia, X., Chen, Z., & Zheng, X. (2025). *A systematic review of photovoltaic power plant site selection approaches: Literature retrieval and analysis method based on ChatGPT and DeepSeek*. *Energy Reports*, 14, 1993–2014. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.08.031>

Mbufua, N. A., Kapen, P. T., Ngapgue, F., & Takougang, A. N. (2025). *Geospatial parametric approach for identifying optimal sites for wind-solar hybrid energy systems*. *Results in Engineering*, 27, Article 106448. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106448>

Qi, D., Kang, J., Liu, J., Chen, S., Chen, W., Xie, G., & Wang, W. (2026). *Layout optimization of mountain PV involving hydro-PV hybrid system and site selection*. *Renewable Energy*, 256 (Part B), Article 124018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124018>

Gao, C., Li, S., Tan, Q., Zhang, Z., & Gao, J. (2025). *Research on site selection decision-making method for wind-photovoltaic-shared energy storage stations considering differentiated linguistic terms from a resilience perspective*. *Journal of Energy Storage*, 139 (Part A), Article 118642. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118642>

Raptis, P., & Aretoulis, G. (2024). *Supporting strategy for investment evaluation of photovoltaic power generation engineering projects using multi-criteria decision analysis methods*. *Solar Compass*, 12, Article 100092. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2024.100092>

Zambrano-Asanza, S., Quiros-Tortos, J., & Franco, J. F. (2021). *Optimal site selection for photovoltaic power plants using a GIS-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110853>

Gökler, S. H. (2025). *Enhanced site selection for solar power plants utilizing the geographic information system and Pythagorean fuzzy analytical hierarchy process method*. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 44, 101929. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101929>

Krishankumar, R., Sundararajan, D., Ishizaka, A., & Ravichandran, K. S. (2025). *A double hierarchy fuzzy decision approach for solar farm ranking sites in India*. *Energy Economics*, 152, Article 108993. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108993>

- Malinić, V., Durlević, U., Brašanac-Bosanac, L., Novković, I., Joksimović, M., Golić, R., & Krstić, F. (2025). A hybrid fuzzy AHP–MULTIMOORA approach for solar energy development on rural brownfield sites in Serbia. *Sustainability*, 17(17), 7988. <https://doi.org/10.3390/su17177988>
- Karadöl, İ., & Yıldırım, R. (2025). Location choice in solar power plants by applying meteorological data to multi-criteria decision-making method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 152, 110766. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110766>
- Çolak, H. E., Memişoğlu, T., & Gerçek, Y. (2020). Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy*, 149, 565–576. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078>
- Farnaz, Nuthammachot, N., & Shabbir, R. (2025). Evaluating site selection for optimal photovoltaic installations and CO<sub>2</sub> emission reduction in selected districts of Khyber Pakhtunkhwa. *Scientific Reports*, 15, 6635. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86713-5>
- Al-Awadhi, T., Al Ramimi, W., Al Jabri, K., & Abulibdeh, A. (2025). Solar farms suitability analysis using GIS-based Analytic Hierarchy Process (AHP) multi-criteria: A case study of Al Duqm – Oman. *Renewable Energy*, 241, 122295. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122295>
- Memduhoğlu, A., Fulman, N., Polat, N., & Ataş, T. (2026). Large language models as virtual experts? Evaluating AHP-based criteria weighting performance for solar power plant site selection. *Expert Systems with Applications*, 299 (Part B), 130171. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130171>
- Guehrar, Y., Settou, N., & Settou, B. (2026). An integrated methodology framework for optimizing photovoltaic distributed generation in semi-arid zones: Case study of Ouargla, Algeria. *Energy Conversion and Management*, 270, 120591. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120591>
- He, Z., Li, S., Chen, G., & Wang, L. (2026). MCSFI: A detection network for photovoltaic panel defect detection of multi-scale content-aware feature integration. *Digital Signal Processing*, 168, 105571. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2025.105571>

- Hooshangi, N., Mahdizadeh Gharakhanlou, N., & Ghaffari Razin, S. R. (2023). *Evaluation of potential sites in Iran to localize solar farms using a GIS-based Fermatean Fuzzy TOPSIS*. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135481. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135481>
- Yilmaz, İ., Kocer, A., & Aksoy, E. (2024). *Site selection for solar power plants using GIS and fuzzy analytic hierarchy process: Case study of the western Mediterranean region of Turkiye*. *Renewable Energy*, 237, 121799. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121799>
- Elboshy, B., Alwetaishi, M., Aly, R. M. H., & Zalhaf, A. S. (2022). *A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility*. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101618. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.013>
- Hassan, I., Alhamrouni, I., & Azhan, N. H. (2023). *A CRITIC–TOPSIS multi-criteria decision-making approach for optimum site selection for solar PV farm*. **Energies**, 16(10), 4245. <https://doi.org/10.3390/en16104245>
- Cinelli, M., Kadziński, M., Gonzalez, M., & Słowiński, R. (2020). How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega*, 96, 102261. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- Bonakdari, H., Noori, A., & Morovati, K. (2024). *Multicriteria decision-making analysis for civil engineering applications*. Woodhead Publishing (Elsevier). ISBN 978-0-443-22282-5.
- Κοκολάκης, Γ., & Σπηλιώτης, Ι. (1999). *Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστικής (4η έκδ.)*. Εκδόσεις Συμεών.
- Hellenic National Meteorological Service. (n.d.). *The climate of Greece*. EMY. <https://emy.gr/the-climate-of-greece>
- Hellenic National Meteorological Service. (n.d.). *Observation systems*. EMY. <https://emy.gr/observations-systems>
- Solargis. (2021). *Solar resource map: Global horizontal irradiation – Greece [Map]*. <https://solargis.com>
- Solargis. (2021). *Solar resource map: Photovoltaic power potential – Greece [Map]*. <https://solargis.com>

Hellenic National Meteorological Service. (n.d.). *Climatic data: Statistics* [Webpage]. EMY. <https://emy.gr/climatic-data?tab=statistics-tab>

Google. (n.d.). *Google Maps* [Online map]. <https://www.google.com/maps>

VPSolutions. (2013). *Visual PROMETHEE 1.4 manual* [Software manual]. <http://www.promethee-gaia.net>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2026). *Έγκριση Ειδικού Χωροταξικού Πλαισίου για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και περιβαλλοντική έγκριση αυτού* (Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΝΕΠ/89998/3072/2026, ΦΕΚ Δ' 694/19.08.2026). Εθνικό Τυπογραφείο.

Ελληνική Δημοκρατία. (1998). *Νόμος 2637/1998: Σύσταση Οργανισμού Πιστοποίησης Λογαριασμών, Οργανισμού Πληρωμών και Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων και άλλες διατάξεις* (ΦΕΚ Α' 200/27.08.1998).

Ελληνική Δημοκρατία. (2011). *Νόμος 4014/2011: Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις* (ΦΕΚ Α' 209/21.09.2011).

Ελληνική Δημοκρατία. (2022). *Νόμος 4951/2022: Εκσυγχρονισμός της αδειοδοτικής διαδικασίας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – Β' φάση, αδειοδότηση παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, πλαίσιο ανάπτυξης πιλοτικών θαλάσσιων πλωτών φωτοβολταϊκών σταθμών και ειδικότερες διατάξεις για την ενέργεια και την προστασία του περιβάλλοντος* (ΦΕΚ Α' 129/04.07.2022).

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2022). *Καθορισμός των προϋποθέσεων, των όρων και της διαδικασίας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών σε γεωργική γη υψηλής παραγωγικότητας* (Κοινή Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/104605/4389/2022, ΦΕΚ Β' 5342/17.10.2022).

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2024). *Τροποποίηση και κωδικοποίηση της κατάταξης έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες και υποκατηγορίες σύμφωνα με τον Ν. 4014/2011 – Έργα ηλεκτροπαραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς* (Υπουργική Απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΠΠΑ/63951/4418/2024, ΦΕΚ Β' 3867/03.07.2024).

Ελληνική Δημοκρατία. (2026). *Νόμος 5306/2026: Κώδικας Χωροταξίας και Πολεοδομίας «Νικόλαος Ταγαράς»* (ΦΕΚ Α' 88/08.06.2026).

*Greek News Agenda. (2024, October 24). Greece unveils revised National Energy and Climate Plan: Aiming for carbon neutrality by 2050.*

*<https://www.greeknewsagenda.gr/greece-revised-national-energy-and-climate-plan/>*

*Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2026, 20 Μαΐου). Νέο Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Ενισχύουμε το πλαίσιο για τη βιώσιμη ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ελλάδα, με πιο σαφείς και αυστηρούς κανόνες, με σεβασμό στο περιβάλλον και μέριμνα για τις τοπικές κοινωνίες.*

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.