



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

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Αξιολόγηση και Επιλογή Χωροθέτησης
Ανεμογεννητριών με τη Χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης»

Μουλουνδάκης Μιχαήλ

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Αρετούλης

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μουλουδάκη Μιχαήλ 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
Ανεμογεννητριών με τη Χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης»

Μουλουδάκης Μιχαήλ

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Γεώργιος Αρετούλης

Μέλος ΣΕΠ ΕΑΠ
Καθηγητής
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Συν- Επιβλέπων Καθηγητής

Μιχαήλ Μαντάς

Μέλος ΣΕΠ ΕΑΠ
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμ. Εφαρμοσμένης Πληροφορικής
Πανεπιστήμιο Μακεδονίας

«Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω επίσης στη σύντροφό μου για τη συνεχή υποστήριξη, την κατανόηση και τη συμπαράστασή της σε όλη αυτή την απαιτητική προσπάθεια.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Αρετούλη, για την ουσιαστική καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και τη συνεχή υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.»

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την αξιολόγηση και επιλογή κατάλληλων θέσεων για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στην Κρήτη, μέσω της εφαρμογής της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE και της αξιοποίησης γεωχωρικών δεδομένων. Η χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων αποτελεί σύνθετη διαδικασία λήψης απόφασης, καθώς απαιτεί τη συνεκτίμηση τεχνικών, περιβαλλοντικών, κοινωνικών και χωροταξικών παραμέτρων.

Στο πλαίσιο της έρευνας εξετάστηκαν τρεις εναλλακτικές περιοχές στην Κρήτη, οι οποίες επιλέχθηκαν βάσει των διαφορετικών γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και συνθηκών αναγλύφου που παρουσιάζουν, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του αναγλύφου στη διαδικασία χωροθέτησης. Οι περιοχές αξιολογήθηκαν βάσει δέκα κριτηρίων που σχετίζονται με το αιολικό δυναμικό, την προσβασιμότητα, τη σύνδεση με ενεργειακές υποδομές, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Τα βάρη των κριτηρίων προέκυψαν από βιβλιογραφική διερεύνηση διεθνών επιστημονικών μελετών σχετικών με τη χωροθέτηση αιολικών πάρκων.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Visual PROMETHEE Academic και περιλάμβανε βασικό σενάριο με χρήση της συνάρτησης προτίμησης V-shape, έλεγχο ευαισθησίας με χρήση της συνάρτησης Usual και εναλλακτικό σενάριο με αυξημένη έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η περιοχή Ακρωτήρι Αγίου Ιωάννη Βρουχά παρουσιάζει την υψηλότερη συνολική καταλληλότητα στο βασικό σενάριο, ενώ στο εναλλακτικό σενάριο η περιοχή Επανωσήφης κατατάσσεται πρώτη, γεγονός που αναδεικνύει τη σημαντική επίδραση των βαρών και των προτεραιοτήτων στη διαδικασία λήψης απόφασης.

Συνολικά, η εργασία καταδεικνύει ότι η πολυκριτηριακή ανάλυση, σε συνδυασμό με την αξιοποίηση γεωχωρικών δεδομένων, μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων.

Λέξεις-κλειδιά: αιολική ενέργεια, χωροθέτηση αιολικών πάρκων, πολυκριτηριακή ανάλυση, PROMETHEE, Visual PROMETHEE, GIS, Κρήτη

Abstract

The present dissertation examines the evaluation and selection of suitable sites for wind turbine installation in Crete through the application of the PROMETHEE multi-criteria analysis method and the use of geospatial data. Wind farm siting constitutes a complex decision-making process, as it requires the consideration of technical, environmental, social, and spatial parameters.

Within the framework of the study, three alternative areas in Crete were examined, selected based on their different geomorphological and topographical characteristics to investigate the influence of terrain conditions on the wind farm siting process. The areas were evaluated based on ten criteria related to wind potential, accessibility, connection to energy infrastructure, geomorphological conditions, and environmental and social impacts. The weights assigned to the criteria were derived from a review of international scientific studies concerning wind farm siting.

The analysis was carried out using the Visual PROMETHEE Academic software and included a baseline scenario using the V-shape preference function, a sensitivity analysis using the Usual preference function, and an alternative scenario with increased emphasis on environmental and social criteria. The results indicated that the area of Akrotiri Agiou Ioanni Vroucha achieved the highest overall suitability in the baseline scenario, while under the alternative scenario the Epanosifis area ranked first, highlighting the significant influence of criteria weighting and decision priorities on the final outcome.

Overall, the study demonstrates that multi-criteria analysis, combined with the use of geospatial data, can serve as an effective decision-support tool for wind farm siting.

Keywords: wind energy, wind farm siting, multi-criteria analysis, PROMETHEE, Visual PROMETHEE, GIS, Crete

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Κατάλογος εικόνων	x
Κατάλογος πινάκων.....	xi
Πρόλογος.....	xii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	2
1.2 Ερευνητικά ερωτήματα	3
1.3 Δομή της εργασίας	4
2. Θεωρητικό και Νομικό Πλαίσιο Αιολικών Εγκαταστάσεων.....	7
2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	7
2.2 Αιολική ενέργεια, ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα.....	8
2.3 Χωροθέτηση αιολικών πάρκων – βασικές αρχές και περιορισμοί	11
2.4 Νομικό και χωροταξικό πλαίσιο για τα αιολικά πάρκα	14
2.5 Μεθοδολογίες πολυκριτηριακής αξιολόγησης στη χωροθέτηση	17
3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	19
3.1 Γενικές τάσεις και μεθοδολογίες στην επιλογή θέσεων αιολικών πάρκων.....	19
3.2 Χωροθέτηση αιολικών πάρκων σε ευρύτερο γεωγραφικό πλαίσιο	21
3.3 Χωροθέτηση αιολικών πάρκων στην Ελλάδα	24
3.4 Σύνθεση της βιβλιογραφίας και σύνδεση με την παρούσα έρευνα.....	27
4. Πολυκριτηριακές Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων και η Μέθοδος PROMETHEE.....	31
4.1 Θεμελιώδεις έννοιες πολυκριτηριακής ανάλυσης.....	31
4.2 Βασικές μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης	34
4.3 Εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων.....	36
4.4 Περιγραφή της μεθόδου PROMETHEE.....	38

4.5 Το λογισμικό Visual PROMETHEE	40
5. Μεθοδολογικό Πλαίσιο της Έρευνας	43
5.1 Γενική Περιγραφή Μεθοδολογίας	43
5.2 Περιγραφή περιοχών μελέτης.....	44
5.2.1 Ορεινό Περιβάλλον: Βοσκερό	45
5.2.2 Ημιορεινό Περιβάλλον: Επανωσήφης.....	45
5.2.3 Παραθαλάσσιο Περιβάλλον: Ακρωτήρι Αγίου Ιωάννη Βρουχά.....	46
5.3 Προσδιορισμός Κριτηρίων Αξιολόγησης.....	47
5.3.1 Εισαγωγή στα κριτήρια αξιολόγησης.....	47
5.3.2 Αναλυτική παρουσίαση των κριτηρίων αξιολόγησης	48
6. Εφαρμογή της Μεθόδου PROMETHEE στη Μελέτη Περίπτωσης.....	68
6.1 Κατεύθυνση προτίμησης των κριτηρίων.....	68
6.2 Προσδιορισμός βαρών κριτηρίων.....	70
6.2.1 Αιολικό δυναμικό.....	71
6.2.2 Απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	71
6.2.3 Απόσταση από οδικό δίκτυο	72
6.2.4 Απόσταση από πλησιέστερο οικισμό.....	72
6.2.5 Μέση κλίση εδάφους	73
6.2.6 Υψόμετρο	73
6.2.7 Απόσταση από περιοχές τουριστικής δραστηριότητας.....	74
6.2.8 Απόσταση από οριοθετημένους αρχαιολογικούς χώρους	74
6.2.9 Δασικές εκτάσεις	75
6.2.10 Απόσταση από περιοχές Natura 2000	75
6.3 Εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE.....	77
6.3.1 Βασική επίλυση με συνάρτηση V-shape	78
6.3.2 Έλεγχος με συνάρτηση Usual	79
6.3.3 Εναλλακτική επίλυση βάσει Manolan Kandy et al. (2024).....	80

6.4 Ιεράρχηση και συγκριτική αξιολόγηση θέσεων	81
6.4.1 Αποτελέσματα βασικού σεναρίου (V-shape).....	81
6.4.2 Έλεγχος αξιοπιστίας αποτελεσμάτων με τη συνάρτηση Usual.....	91
6.4.3 Ανάλυση εναλλακτικής επίλυσης βάσει Manolan Kandy et al. (2024)	93
7. Αποτελέσματα	97
7.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	97
7.2 Επίδραση του αναγλύφου στη συγκριτική κατάταξη	98
7.3 Μεθοδολογικοί περιορισμοί.....	100
8. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	103
8.1 Συμπεράσματα	103
8.2 Μελλοντική έρευνα και προτάσεις	105
Βιβλιογραφία	107

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας.....	8
Εικόνα 2: Αιολικό πάρκο σε ορεινή περιοχή.....	12
Εικόνα 3: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από το δίκτυο υψηλής τάσης	51
Εικόνα 4: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από ασφαλισμένο οδικό δίκτυο	53
Εικόνα 5: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από πλησιέστερο οικισμό	55
Εικόνα 6: Θέση αιολικού πάρκου Βοσκερό – Χάρτης Γ.Υ.Σ. 95273-95274 – κλίμακα 1:5000	57
Εικόνα 7: Θέση αιολικού πάρκου Επανωσήφης – Χάρτης Γ.Υ.Σ. 95393-95395 – κλίμακα 1:5000.....	58
Εικόνα 8: Θέση αιολικού πάρκου Βρουχάς – Χάρτης Γ.Υ.Σ. 96155-96157 – κλίμακα 1:500059	
Εικόνα 9: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από τουριστικές περιοχές	62
Εικόνα 10: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από αρχαιολογικούς χώρους.....	64
Εικόνα 11: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από περιοχές Natura 2000	67
Εικόνα 12: Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων βασικής επίλυσης στο Visual PROMETHEE Academic.....	79
Εικόνα 13: Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων εναλλακτικής επίλυσης στο Visual PROMETHEE Academic	80
Εικόνα 14: Μερική κατάταξη εναλλακτικών θέσεων (PROMETHEE I) βασικού σεναρίου..	82
Εικόνα 15: Ολική κατάταξη εναλλακτικών θέσεων (PROMETHEE II) βασικού σεναρίου...	83
Εικόνα 16: Διάγραμμα PROMETHEE Diamond βασικού σεναρίου	84
Εικόνα 17: Αποτελέσματα PROMETHEE Flow Table βασικού σεναρίου	85
Εικόνα 18: Ανάλυση PROMETHEE GAIA βασικού σεναρίου.....	86
Εικόνα 19: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο αιολικού δυναμικού	87
Εικόνα 20: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο απόσταση από δίκτυο ηλεκ. ενέργειας.....	88
Εικόνα 21: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο απόσταση από οδικό δίκτυο	89
Εικόνα 22: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο απόσταση από πλησιέστερο οικισμό	90
Εικόνα 23: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο μέση κλίση εδάφους	91
Εικόνα 24: PROMETHEE Flow Table με χρήση της συνάρτησης προτίμησης “Usual”	93
Εικόνα 25: PROMETHEE Flow Table της εναλλακτικής επίλυσης	94
Εικόνα 26: PROMETHEE Diamond της εναλλακτικής επίλυσης	95
Εικόνα 27: Ανάλυση PROMETHEE GAIA της εναλλακτικής επίλυσης.....	96

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου (h100) ανά θέση	49
Πίνακας 2: Απόσταση από δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανά θέση	50
Πίνακας 3: Απόσταση από οδικό δίκτυο ανά θέση	52
Πίνακας 4: Απόσταση από πλησιέστερο οικισμό ανά θέση	54
Πίνακας 5: Μέση κλίση εδάφους ανά θέση	56
Πίνακας 6: Απόλυτο υψόμετρο θέσης	60
Πίνακας 7: Απόσταση από τουριστικές περιοχές ανά θέση	62
Πίνακας 8: Απόσταση από αρχαιολογικούς χώρους ανά θέση	64
Πίνακας 9: Χαρακτηρισμός δασικών εκτάσεων ανά θέση	65
Πίνακας 10: Απόσταση από περιοχές Natura 2000	67
Πίνακας 11: Κατανομή βαρών κριτηρίων βασικής επίλυσης	76
Πίνακας 12: Προσαρμοσμένα βάρη εναλλακτικής επίλυσης	77

Πρόλογος

Η συνεχής αύξηση των ενεργειακών αναγκών και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στη στροφή προς περισσότερο βιώσιμες μορφές παραγωγής ενέργειας. Η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η σταδιακή μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν βασικούς στόχους της σύγχρονης ενεργειακής πολιτικής. Στο πλαίσιο αυτό, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, με την αιολική ενέργεια να αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μορφές τους.

Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων συνδέεται άμεσα με τη διαδικασία επιλογής κατάλληλων θέσεων χωροθέτησης, η οποία αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Η καταλληλότητα μιας περιοχής επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, όπως το αιολικό δυναμικό, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, η πρόσβαση σε υποδομές, καθώς και οι περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί περιορισμοί. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων απαιτεί τη συνδυαστική εξέταση πολλών και συχνά αντικρουόμενων κριτηρίων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την αξιολόγηση και επιλογή θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών στην Κρήτη με τη χρήση της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE. Για την υποστήριξη της ανάλυσης αξιοποιήθηκαν γεωχωρικά δεδομένα και εργαλεία GIS, ενώ η επεξεργασία και αξιολόγηση των εναλλακτικών πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Visual PROMETHEE Academic. Οι περιοχές μελέτης επιλέχθηκαν με βάση διαφορετικά χαρακτηριστικά αναγλύφου, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των γεωμορφολογικών συνθηκών στη διαδικασία χωροθέτησης αιολικών εγκαταστάσεων.

1. Εισαγωγή

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί βασικό πυλώνα της σύγχρονης ενεργειακής πολιτικής, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο, καθώς η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια, καθιστούν επιτακτική τη στροφή προς καθαρές μορφές ενέργειας.

Η ανάπτυξη αιολικών εγκαταστάσεων συνδέεται άμεσα με την ορθολογική επιλογή θέσεων, καθώς η χωροθέτηση επηρεάζει τόσο την ενεργειακή απόδοση των ανεμογεννητριών όσο και τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις των έργων. Η επιλογή κατάλληλης θέσης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου, καθώς μια μη ορθολογική χωροθέτηση μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση, αυξημένο κόστος υλοποίησης και λειτουργίας, καθώς και σε συγκρούσεις με περιβαλλοντικές δεσμεύσεις ή τοπικές δραστηριότητες.

Αντίθετα, μια τεκμηριωμένη προσέγγιση συμβάλλει στην καλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού και στη λειτουργικότερη ένταξη των έργων στο χώρο. Η διαδικασία χωροθέτησης αιολικών πάρκων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων, καθώς απαιτεί τη συνεκτίμηση πλήθους και συχνά αντικρουόμενων κριτηρίων, όπως τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια. Στην κατεύθυνση αυτή, η εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης αναδεικνύεται ως ένα αξιόπιστο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο επιτρέπει τη συστηματική αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων και τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων επιλογών.

Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο πεδίο της πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, με έμφαση στη συνδυαστική αξιοποίηση γεωχωρικών δεδομένων και της μεθόδου PROMETHEE. Μέσα από τη συγκεκριμένη προσέγγιση επιδιώκεται η συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών θέσεων και η ανάδειξη της καταλληλότερης, με βάση ένα σύνολο σαφώς ορισμένων κριτηρίων.

Στο πλαίσιο αυτό, η μελέτη επικεντρώνεται στην αξιολόγηση εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών, όπως αναλύεται στα επόμενα υποκεφάλαια.

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση και η επιλογή κατάλληλων θέσεων για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών, μέσα από τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης και συγκεκριμένα της μεθόδου PROMETHEE. Η προσέγγιση αυτή επιλέγεται, καθώς ανταποκρίνεται στη φύση του προβλήματος, το οποίο χαρακτηρίζεται από την ανάγκη ταυτόχρονης εξέτασης πολλών και συχνά αντικρουόμενων παραμέτρων.

Στην εργασία εξετάζονται τρεις περιοχές με διαφορετικό ανάγλυφο, οι οποίες αντιστοιχούν σε ορεινό, ημιορεινό και παράκτιο ανάγλυφο, ώστε να διερευνηθεί στην πράξη πώς οι γεωμορφολογικές συνθήκες επηρεάζουν την καταλληλότητα μιας θέσης για την εγκατάσταση αιολικών συστημάτων. Η επιλογή των συγκεκριμένων περιοχών δεν είναι τυχαία, αλλά αποσκοπεί στη δημιουργία ενός συγκριτικού πλαισίου αξιολόγησης, μέσα στο οποίο αναδεικνύονται οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από τις τοπικές ιδιαιτερότητες.

Στο πλαίσιο της εργασίας, προσδιορίζεται ένα σύνολο κριτηρίων που σχετίζονται με τεχνικές, περιβαλλοντικές και χωρικές παραμέτρους, τα οποία ποσοτικοποιούνται με τη χρήση γεωχωρικών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά ενσωματώνονται σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), επιτρέποντας τη χωρική τους ανάλυση και την εξαγωγή μετρήσιμων μεταβλητών για κάθε εναλλακτική θέση.

Πέρα από τα γεωχωρικά δεδομένα, στο πλαίσιο της εργασίας αξιοποιούνται και λοιπά ποσοτικά στοιχεία, τα οποία προέρχονται από επίσημες και αξιόπιστες πηγές, όπως το Global Wind Atlas. Τα στοιχεία αυτά αφορούν βασικές παραμέτρους της αξιολόγησης, όπως το αιολικό δυναμικό των περιοχών μελέτης και ενσωματώνονται στο σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός δομημένου και εφαρμόσιμου πλαισίου αξιολόγησης για τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, το οποίο να μπορεί να υποστηρίξει με συστηματικό τρόπο τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στον συνδυασμό γεωχωρικών και λοιπών ποσοτικών δεδομένων με πολυκριτηριακές μεθόδους ανάλυσης, επιτρέποντας τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών θέσεων με βάση ένα σύνολο σαφώς καθορισμένων κριτηρίων.

Παράλληλα, επιδιώκεται η διερεύνηση της επίδρασης που έχουν τόσο η επιλογή των κριτηρίων όσο και η στάθμισή τους στη διαμόρφωση της τελικής κατάταξης των εναλλακτικών θέσεων. Μέσω της διαδικασίας αυτής, αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο διαφορετικές προσεγγίσεις μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης και, κατ' επέκταση, τη λήψη της τελικής απόφασης.

Η μελέτη στοχεύει στην ανάδειξη της χρησιμότητας της μεθόδου PROMETHEE ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων, καθώς και στην κατανόηση των δυνατοτήτων που παρέχει για την αποτύπωση των σχέσεων υπεροχής μεταξύ των εναλλακτικών θέσεων. Τέλος, εξετάζεται η ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε διαφορετικές παραδοχές και επιλογές παραμέτρων, συμβάλλοντας έτσι σε μια πιο ολοκληρωμένη και τεκμηριωμένη προσέγγιση του ζητήματος της χωροθέτησης αιολικών εγκαταστάσεων.

1.2 Ερευνητικά ερωτήματα

Με βάση το αντικείμενο και τη μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας, διατυπώνονται τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία λειτουργούν ως βασικός οδηγός της ανάλυσης. Τα ερωτήματα αυτά προκύπτουν από την ανάγκη συστηματικής διερεύνησης των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διαδικασία χωροθέτησης αιολικών εγκαταστάσεων και αποσκοπούν στην καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που διαμορφώνουν τα τελικά αποτελέσματα.

- Ποια είναι τα βασικά κριτήρια που επηρεάζουν την καταλληλότητα μιας θέσης για εγκατάσταση ανεμογεννητριών και πώς ενσωματώνονται στο μοντέλο αξιολόγησης;
- Με ποιον τρόπο η στάθμιση των κριτηρίων επηρεάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης και την τελική κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων;

- Σε ποιο βαθμό η μέθοδος PROMETHEE μπορεί να υποστηρίξει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, αποδίδοντας με σαφή τρόπο τις σχέσεις υπεροχής μεταξύ των εναλλακτικών;
- Πώς επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του αναγλύφου (όπως η κλίση, το υψόμετρο και η χωρική διάρθρωση) τα αποτελέσματα της αξιολόγησης;

Τα προαναφερθέντα ερωτήματα δεν εξετάζονται μεμονωμένα, αλλά συνδυαστικά, καθώς η διαδικασία αξιολόγησης αποτελεί ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα, στο οποίο οι επιμέρους παράμετροι αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Η συνδυαστική προσέγγιση επιτρέπει την πληρέστερη αποτύπωση της καταλληλότητας των εναλλακτικών θέσεων και συμβάλλει στην εξαγωγή πιο τεκμηριωμένων συμπερασμάτων.

Παράλληλα, η διατύπωση των ερευνητικών ερωτημάτων συνδέει τη θεωρητική ανάλυση με την πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας, καθώς η απάντησή τους προκύπτει μέσα από την επεξεργασία πραγματικών δεδομένων και την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η κατανόηση της διαδικασίας χωροθέτησης αιολικών εγκαταστάσεων σε πραγματικές συνθήκες και αναδεικνύεται η σημασία της μεθοδολογικής προσέγγισης που ακολουθείται.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια, τα οποία αναπτύσσονται με τρόπο που επιτρέπει τη σταδιακή μετάβαση από το θεωρητικό και θεσμικό πλαίσιο στη βιβλιογραφική διερεύνηση, τη μεθοδολογική προσέγγιση, την εφαρμογή της μεθόδου και, τέλος, την ανάλυση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της έρευνας, το αντικείμενο και ο σκοπός της εργασίας, καθώς και τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που καθορίζουν την ανάπτυξή της. Παράλληλα, παρουσιάζεται η δομή και η οργάνωση των επιμέρους κεφαλαίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται το θεωρητικό και θεσμικό πλαίσιο της χωροθέτησης αιολικών πάρκων. Παρουσιάζονται βασικές έννοιες που σχετίζονται με

την αιολική ενέργεια και την ανάπτυξη αιολικών εγκαταστάσεων, οι σημαντικότεροι παράγοντες και τα κριτήρια που επηρεάζουν την επιλογή κατάλληλων θέσεων, καθώς και το νομικό και χωροταξικό πλαίσιο που διέπει τη χωροθέτησή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση των σύγχρονων προσεγγίσεων που εφαρμόζονται στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων. Εξετάζονται προηγούμενες ερευνητικές εργασίες, οι μεθοδολογίες πολυκριτηριακής αξιολόγησης που έχουν χρησιμοποιηθεί, τα κριτήρια επιλογής θέσεων και τα βασικά συμπεράσματα της σχετικής βιβλιογραφίας. Παράλληλα, πραγματοποιείται σύνθεση των βασικών ευρημάτων της βιβλιογραφίας και αναδεικνύεται η σύνδεσή τους με την παρούσα έρευνα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων και αναλύονται οι κυριότερες μέθοδοι που εφαρμόζονται σε προβλήματα αξιολόγησης και χωροθέτησης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μέθοδο PROMETHEE, στο θεωρητικό της υπόβαθρο, στις ροές υπεροχής και στον τρόπο κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων, καθώς και στις δυνατότητες που παρέχει το λογισμικό Visual PROMETHEE.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογική προσέγγιση της έρευνας και παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται. Αναλύονται οι εξεταζόμενες περιοχές μελέτης στην Κρήτη, η επιλογή και τεκμηρίωση των κριτηρίων αξιολόγησης, καθώς και η διαδικασία συλλογής, επεξεργασίας και οργάνωσης των γεωχωρικών και λοιπών δεδομένων που απαιτούνται για την εφαρμογή της ανάλυσης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE στις εξεταζόμενες εναλλακτικές θέσεις. Καθορίζονται τα βάρη και οι συναρτήσεις προτίμησης των κριτηρίων, διαμορφώνονται τα εξεταζόμενα σενάρια και πραγματοποιείται η αξιολόγηση και κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων, καθώς και η ανάλυση ευαισθησίας.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, με έμφαση στην κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων, στην επίδραση των επιμέρους κριτηρίων και στις διαφοροποιήσεις μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων. Παράλληλα, εξετάζεται η σταθερότητα των αποτελεσμάτων και οι βασικοί μεθοδολογικοί περιορισμοί της έρευνας.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και μελλοντική αξιοποίηση της προτεινόμενης προσέγγισης.

2. Θεωρητικό και Νομικό Πλαίσιο Αιολικών Εγκαταστάσεων

2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν βασικό πυλώνα της σύγχρονης ενεργειακής πολιτικής, καθώς συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων που επιβαρύνουν το κλίμα και στην προστασία του περιβάλλοντος. Πρόκειται για μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διεργασίες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, το νερό και η γεωθερμία, οι οποίες ανανεώνονται συνεχώς και δεν εξαντλούνται με την πάροδο του χρόνου (IPCC, 2011).

Η ανάγκη για μετάβαση σε καθαρότερες μορφές ενέργειας έχει ενταθεί τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως λόγω της κλιματικής αλλαγής και της αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη των ΑΠΕ συνδέεται άμεσα με διεθνείς και ευρωπαϊκές πολιτικές που στοχεύουν στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και στην επίτευξη ενεργειακής βιωσιμότητας. Παράλληλα, οι ΑΠΕ συμβάλλουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας, καθώς αξιοποιούν εγχώριους φυσικούς πόρους (IRENA, 2024).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η αξιοποίηση των ΑΠΕ συνδέεται και με σύνθετες προκλήσεις. Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές χαρακτηρίζεται συχνά από μεταβλητότητα, καθώς εξαρτάται από φυσικές συνθήκες που δεν είναι πλήρως ελέγξιμες. Για παράδειγμα, η παραγωγή αιολικής ενέργειας εξαρτάται από τη διακύμανση της έντασης και της κατεύθυνσης του ανέμου. Αυτό δημιουργεί ανάγκες για αποθήκευση ενέργειας και ενίσχυση των δικτύων μεταφοράς (IEA, 2023).

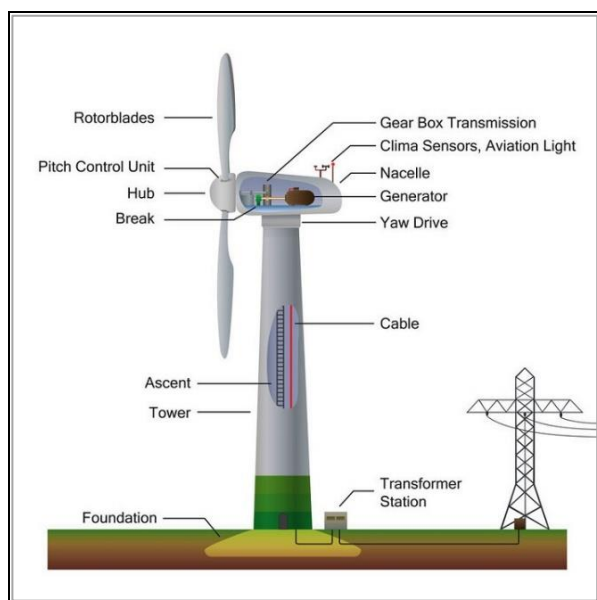
Επιπλέον, η ανάπτυξη των ΑΠΕ συνδέεται με ζητήματα χωροθέτησης, καθώς οι εγκαταστάσεις τους καταλαμβάνουν χώρο και ενδέχεται να επηρεάζουν το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Η σωστή επιλογή θέσεων εγκατάστασης αποτελεί επομένως κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή ανάπτυξή τους (Shao et al., 2020).

Στο πλαίσιο αυτό, η αιολική ενέργεια αναδεικνύεται ως μία από τις πλέον ώριμες και διαδεδομένες μορφές ΑΠΕ. Ωστόσο, η αποτελεσματική αξιοποίησή της δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογία των ανεμογεννητριών, αλλά και από την επιλογή κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης, η οποία απαιτεί τη συνεκτίμηση τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων (Latinopoulos & Kechagia, 2015; Tsoutsos et al., 2015). Το ζήτημα αυτό εξετάζεται αναλυτικότερα στις επόμενες ενότητες.

2.2 Αιολική ενέργεια, ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, αξιοποιώντας την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιοποίησή της βασίζεται στη λειτουργία των ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου αρχικά σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική (Imam et al., 2024).

Για την καλύτερη κατανόηση της δομής και της λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας, στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται τα βασικά μέρη που τη συνθέτουν.



Εικόνα 1: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από επιμέρους στοιχεία, τα οποία συνεργάζονται για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική (Windustry, n.d.). Τα βασικότερα μέρη της είναι τα ακόλουθα:

- **Πτερύγια (rotorblades):** Αποτελούν το βασικό στοιχείο αλληλεπίδρασης με τον άνεμο και είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε περιστροφική κίνηση.
- **Μονάδα ελέγχου γωνίας πτερυγίων (pitch control unit):** Ρυθμίζει τη γωνία των πτερυγίων, προκειμένου να ελέγχεται η ταχύτητα περιστροφής και η απόδοση της ανεμογεννήτριας.
- **Πλήμνη (hub):** Συνδέει τα πτερύγια με τον κύριο άξονα και μεταφέρει την περιστροφική κίνηση στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας.
- **Φρένο (brake):** Χρησιμοποιείται για την επιβράδυνση ή τη διακοπή της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας σε περιπτώσεις ανάγκης ή συντήρησης.
- **Κιβώτιο ταχυτήτων (gear box transmission):** Αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα, ώστε να είναι κατάλληλη για τη λειτουργία της γεννήτριας.
- **Αισθητήρες και σύστημα φωτισμού (climate sensors, aviation light):** Οι αισθητήρες καταγράφουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, ενώ ο φωτισμός χρησιμοποιείται για την ασφάλεια της εναέριας κυκλοφορίας.
- **Άτρακτος (nacelle):** Περιλαμβάνει τα βασικά μηχανικά και ηλεκτρικά μέρη της ανεμογεννήτριας και τα προστατεύει από εξωτερικές συνθήκες.
- **Γεννήτρια (generator):** Μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.
- **Σύστημα προσανατολισμού (yaw drive):** Επιτρέπει την περιστροφή της ανεμογεννήτριας ώστε να ευθυγραμμίζεται με τη διεύθυνση του ανέμου.
- **Καλώδιο (cable):** Μεταφέρει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια προς το δίκτυο.
- **Ανελκυστήρας/σύστημα πρόσβασης (ascent):** Διευκολύνει την πρόσβαση στο εσωτερικό του πύργου για λόγους συντήρησης.
- **Πύργος (tower):** Στηρίζει το σύνολο της κατασκευής και εξασφαλίζει λειτουργία σε κατάλληλο ύψος.

- **Θεμέλιο (foundation):** Παρέχει σταθερότητα και στήριξη στην ανεμογεννήτρια.
- **Υποσταθμός μετασχηματισμού (transformer station):** Μετασχηματίζει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε κατάλληλη τάση για μεταφορά στο δίκτυο.

Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας βασίζεται στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε περιστροφική κίνηση μέσω των πτερυγίων και του ρότορα. Η κίνηση αυτή μεταφέρεται μέσω των αξόνων στο κιβώτιο ταχυτήτων και στη συνέχεια στη γεννήτρια, όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας ρυθμίζεται από το σύστημα ελέγχου, το οποίο αξιοποιεί δεδομένα από το ανεμόμετρο και τον ανεμοδείκτη, προκειμένου να προσαρμόζει τη λειτουργία της στις εκάστοτε συνθήκες (Bilendo et al., 2023).

Η απόδοση της ανεμογεννήτριας συνδέεται με βασικά τεχνολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η επιφάνεια σάρωσης του ρότορα και η καμπύλη ισχύος. Η καμπύλη ισχύος αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό, καθώς αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης και της παραγόμενης ισχύος της ανεμογεννήτριας (Bilendo et al., 2023).

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω της οργανωμένης εγκατάστασης περισσότερων ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα. Ένα αιολικό πάρκο αποτελεί σύνολο ανεμογεννητριών, οι οποίες εγκαθίστανται σε κοινή περιοχή και λειτουργούν συλλογικά ως μία ενιαία εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με το μέγεθος και την ισχύ της εγκατάστασης, ένα αιολικό πάρκο μπορεί να περιλαμβάνει από μικρό αριθμό έως και μεγάλο πλήθος ανεμογεννητριών. Εκτός από τις ανεμογεννήτριες, περιλαμβάνει τις απαραίτητες συνοδευτικές υποδομές για τη λειτουργία του και τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας, όπως εσωτερικό ηλεκτρικό δίκτυο, μετασχηματιστές, υποσταθμούς, οδούς πρόσβασης και εγκαταστάσεις σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο (U.S. Department of Energy, n.d.).

Η συνολική λειτουργία και απόδοση ενός αιολικού πάρκου δεν εξαρτάται μόνο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε ανεμογεννήτριας, αλλά και από τη χωρική διάταξή τους και τις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης. Η μεταξύ τους απόσταση και

η θέση τους σε σχέση με την επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου επηρεάζουν την αξιοποίηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, καθώς η λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να μεταβάλει τη ροή του αέρα στην κατάντη περιοχή και να επηρεάσει την απόδοση γειτονικών ανεμογεννητριών. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός της διάταξης των ανεμογεννητριών αποτελεί σημαντική παράμετρο κατά την ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου (Dinçer et al., 2023).

Εκτός από τη διάταξη των ανεμογεννητριών, καθοριστική σημασία για την ενεργειακή απόδοση του πάρκου έχει και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης. Παράγοντες όπως η μέση ταχύτητα του ανέμου, η κατανομή της έντασής του, η τραχύτητα του εδάφους και η τοπογραφία επηρεάζουν σημαντικά τη ροή του ανέμου και, κατά συνέπεια, την ενεργειακή απόδοση της εγκατάστασης (Imam et al., 2024).

Παρόλο που η αιολική ενέργεια παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, συνοδεύεται και από ορισμένες επιπτώσεις, όπως η οπτική όχληση, ο θόρυβος και η πιθανή επίδραση στην τοπική πανίδα. Για τον λόγο αυτό, η τεχνολογική αξιολόγηση μιας περιοχής δεν επαρκεί από μόνη της για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων (Manolan Kandy et al., 2024).

Συνεπώς, η αξιολόγηση μιας θέσης εγκατάστασης δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε τεχνολογικά ή ενεργειακά χαρακτηριστικά, αλλά απαιτεί τη συνεκτίμηση χωρικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων (Shao et al., 2020), όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

2.3 Χωροθέτηση αιολικών πάρκων – βασικές αρχές και περιορισμοί

Η χωροθέτηση αιολικών πάρκων αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία βασίζεται στην αξιολόγηση πολλαπλών παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με την ενεργειακή απόδοση όσο και με τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις των έργων (Shao et al., 2020).

Η επιλογή της κατάλληλης θέσης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την ύπαρξη επαρκούς αιολικού δυναμικού, αλλά απαιτεί τη συνεκτίμηση τεχνικών, χωρικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων (Latinopoulos & Kechagia, 2015).

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αιολικού πάρκου σε ορεινή περιοχή, όπου διακρίνονται βασικά στοιχεία που σχετίζονται με τη χωροθέτηση, όπως η μορφολογία του εδάφους, η προσβασιμότητα μέσω οδικού δικτύου και η χωρική διάταξη των ανεμογεννητριών.



Εικόνα 2: Αιολικό πάρκο σε ορεινή περιοχή

Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ (2025), Διαγωνισμός Φωτογραφίας

Η εικόνα αυτή αποτυπώνει με σαφήνεια τη σημασία του αναγλύφου στην επιλογή θέσεων, καθώς οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε θέσεις που εξασφαλίζουν καλύτερη έκθεση στον άνεμο. Παράλληλα, διακρίνεται η ανάγκη κατασκευής οδικού δικτύου, το οποίο επιτρέπει την πρόσβαση για την εγκατάσταση και τη συντήρηση των ανεμογεννητριών (Latinopoulos & Kechagia, 2015).

Τα βασικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- **Τεχνικά κριτήρια:** Περιλαμβάνουν το αιολικό δυναμικό, την ταχύτητα και τα χαρακτηριστικά του ανέμου, καθώς και την απόσταση από τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η ύπαρξη επαρκούς αιολικού δυναμικού αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ενεργειακή απόδοση και τη βιωσιμότητα μιας εγκατάστασης (Bilendo et al., 2023; Moradi et al., 2020).
- **Χωρικά και κατασκευαστικά κριτήρια:** Αφορούν τη μορφολογία του εδάφους, την κλίση, την προσβασιμότητα και τη δυνατότητα κατασκευής υποδομών. Η ανάπτυξη οδικού δικτύου είναι απαραίτητη για τη μεταφορά εξοπλισμού και τη λειτουργία του πάρκου (Josimović et al., 2023; Latinopoulos & Kechagia, 2015).
- **Περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια:** Περιλαμβάνουν την απόσταση από οικισμούς, την ύπαρξη προστατευόμενων περιοχών, καθώς και την επίδραση στο τοπίο και στην τοπική πανίδα. Οι παράγοντες αυτοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για τη βιωσιμότητα και την αποδοχή των έργων (Manolan Kandy et al., 2024).

Η διαδικασία επιλογής θέσεων χαρακτηρίζεται από την ανάγκη εξισορρόπησης των παραπάνω παραμέτρων, καθώς συχνά δεν οδηγούν στην ίδια κατεύθυνση. Για παράδειγμα, περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό μπορεί να παρουσιάζουν αυξημένους περιβαλλοντικούς περιορισμούς ή δυσκολίες πρόσβασης (Manolan Kandy et al., 2024).

Επιπλέον, η χωρική διάταξη των ανεμογεννητριών αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της διαδικασίας χωροθέτησης, καθώς επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή απόδοση του αιολικού πάρκου. Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να τοποθετούνται σε κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους, ώστε να περιορίζονται τα φαινόμενα αεροδυναμικής σκίασης (wake effect), τα οποία μπορούν να προκαλέσουν μείωση της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος στις κατάντη ανεμογεννήτριες (Dinçer et al., 2023).

Συνεπώς, η επιλογή θέσεων για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων δεν αποτελεί μια απλή τεχνική διαδικασία, αλλά μια πολυπαραγοντική προσέγγιση που απαιτεί τη συνδυασμένη αξιολόγηση διαφορετικών και συχνά αντικρουόμενων κριτηρίων. Παράλληλα, η δυνατότητα αξιοποίησης μιας περιοχής για την ανάπτυξη αιολικών

εγκαταστάσεων επηρεάζεται από το ισχύον νομικό και χωροταξικό πλαίσιο, το οποίο καθορίζει βασικούς περιορισμούς και προϋποθέσεις χωροθέτησης. Για τον λόγο αυτό, πριν από την παρουσίαση των μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης, κρίνεται σκόπιμη η συνοπτική αναφορά στο νομικό και χωροταξικό πλαίσιο που διέπει την ανάπτυξη των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα.

2.4 Νομικό και χωροταξικό πλαίσιο για τα αιολικά πάρκα

Η χωροθέτηση και ανάπτυξη αιολικών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα διέπεται από ένα σύνθετο θεσμικό πλαίσιο, το οποίο περιλαμβάνει χωροταξικές, περιβαλλοντικές και αδειοδοτικές ρυθμίσεις. Η επιλογή μιας κατάλληλης θέσης δεν καθορίζεται αποκλειστικά από τεχνικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά, όπως το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό και η δυνατότητα σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά προϋποθέτει παράλληλα τη συνεκτίμηση των υφιστάμενων χρήσεων γης, των χαρακτηριστικών του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος, των περιοχών προστασίας και των κατευθύνσεων του χωρικού σχεδιασμού.

Κεντρικό θεσμικό εργαλείο για τη χωρική οργάνωση των έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτελεί το Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΕΧΠ-ΑΠΕ), το οποίο εγκρίθηκε με την υπ' αριθ. ΥΠΕΝ/ΔΝΕΠ/89998/3072 απόφαση και δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ Δ' 694/19.08.2026. Το νέο ΕΧΠ-ΑΠΕ αποσκοπεί στη διαμόρφωση ενός συνεκτικού πλαισίου κατευθύνσεων και ρυθμίσεων για τη χωρική διάρθρωση των εγκαταστάσεων ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη τον ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ηπειρωτικού, νησιωτικού και θαλάσσιου χώρου, καθώς και τις ανάγκες προστασίας περιοχών με ιδιαίτερο περιβαλλοντικό, οικολογικό και πολιτιστικό ενδιαφέρον. Παράλληλα, προβλέπει την επικαιροποίηση των κανόνων και κριτηρίων χωροθέτησης, την αναθεώρηση των περιοχών αποκλεισμού και την ενίσχυση των μηχανισμών παρακολούθησης της χωρικής ανάπτυξης των ΑΠΕ.

Με τη δημοσίευση του νέου Πλαισίου καταργήθηκε η υπ' αριθ. 49828/12.11.2008 απόφαση, με την οποία είχε εγκριθεί το προηγούμενο Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού

Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ. Ως εκ τούτου, το νέο ΕΧΠ-ΑΠΕ αποτελεί πλέον το ισχύον βασικό χωροταξικό πλαίσιο αναφοράς για τη χωροθέτηση και ανάπτυξη εγκαταστάσεων ΑΠΕ.

Ειδικότερα ως προς τις αιολικές εγκαταστάσεις, το ΕΧΠ-ΑΠΕ διακρίνει τον εθνικό χώρο σε επιμέρους κατηγορίες με κριτήριο το εν δυνάμει εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό και τα ιδιαίτερα χωροταξικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής. Στο πλαίσιο αυτό, η Κρήτη εντάσσεται στην κατηγορία της ηπειρωτικής χώρας, μαζί με την Εύβοια. Παράλληλα, εισάγεται η έννοια των Περιοχών Καταλληλότητας, οι οποίες προσδιορίζονται σε επίπεδο Δημοτικής Ενότητας και χαρακτηρίζονται από σημαντικό αιολικό δυναμικό, με τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων να επιτρέπεται καταρχήν υπό την προϋπόθεση τήρησης των θεσπιζόμενων χωροταξικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων.

Για τις Δημοτικές Ενότητες της Κρήτης προβλέπεται ειδικό όριο ως προς τη φέρουσα ικανότητα, καθώς το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό εδαφικής κάλυψης από αιολικές εγκαταστάσεις δεν μπορεί να υπερβαίνει το 4% της έκτασης κάθε Δημοτικής Ενότητας. Η ρύθμιση αυτή εντάσσεται στη λογική ελέγχου της συγκέντρωσης των εγκαταστάσεων και της συνολικής χωρικής τους επίδρασης.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν επίσης οι περιοχές αποκλεισμού και οι ζώνες ασυμβατότητας, εντός των οποίων η εγκατάσταση αιολικών έργων δεν επιτρέπεται ή υπόκειται σε ειδικές προϋποθέσεις. Στις περιοχές αυτές περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, συγκεκριμένες κατηγορίες αρχαιολογικών χώρων και μνημείων, ζώνες απολύτου προστασίας και προστασίας της φύσης, οικότοποι προτεραιότητας των Ειδικών Ζωνών Διατήρησης του Δικτύου Natura 2000, ορισμένες Ζώνες Ειδικής Προστασίας, Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους, Περιοχές Άνευ Δρόμων, καθώς και περιοχές με υψόμετρο μεγαλύτερο των 1.200 m. Περιορισμοί προβλέπονται επίσης σε σχέση με οικιστικές και τουριστικές χρήσεις, ακτές κολύμβησης και άλλες κατηγορίες χώρου που χαρακτηρίζονται από αυξημένη περιβαλλοντική ή χωρική ευαισθησία.

Πέρα από τις περιοχές αποκλεισμού, το νέο ΕΧΠ-ΑΠΕ προβλέπει την τήρηση ελάχιστων αποστάσεων των αιολικών εγκαταστάσεων από γειτνιάζουσες χρήσεις γης,

δραστηριότητες και δίκτυα τεχνικής υποδομής, σύμφωνα με τις ειδικότερες προβλέψεις των παραρτημάτων του. Παράλληλα, διατυπώνονται κατευθύνσεις για την κατά προτεραιότητα αξιοποίηση υφιστάμενων οδών πρόσβασης, τον περιορισμό εκτεταμένων εκσκαφών και επεμβάσεων στη βλάστηση, την εφαρμογή αντιδιαβρωτικών και αντιπλημμυρικών μέτρων και, κατά το δυνατόν, τη σύνδεση των έργων με τα υφιστάμενα δίκτυα και τις υπάρχουσες υποδομές. Οι ρυθμίσεις αυτές καταδεικνύουν τη στενή σχέση μεταξύ χωροθέτησης, τεχνικής προσβασιμότητας και προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος.

Το νέο θεσμικό πλαίσιο αποδίδει επίσης ιδιαίτερη σημασία στην ένταξη των εγκαταστάσεων ΑΠΕ στο τοπίο. Σύμφωνα με το άρθρο 26 του ΕΧΠ-ΑΠΕ, η προστασία του τοπίου εξετάζεται μέσω των περιοχών αποκλεισμού, των επιμέρους κανόνων χωροθέτησης και ειδικών κριτηρίων ένταξης. Για τα αιολικά έργα προβλέπεται ειδικότερα η σύνταξη ειδικής μελέτης τοπίου ως διακριτού τμήματος της διαδικασίας περιβαλλοντικής αδειοδότησης. Η πρόβλεψη αυτή ενισχύει τον ρόλο της οπτικής και τοπιακής διάστασης στην αξιολόγηση της καταλληλότητας μιας θέσης.

Παράλληλα με τον χωροταξικό σχεδιασμό, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η περιβαλλοντική αδειοδότηση των αιολικών έργων. Το βασικό σχετικό πλαίσιο καθορίζεται από τον Ν. 4014/2011, όπως ισχύει, ο οποίος ρυθμίζει την περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων. Σκοπός της διαδικασίας είναι η αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων ενός έργου στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον και η θέσπιση των απαιτούμενων περιβαλλοντικών όρων πριν από την υλοποίησή του. Ανάλογα με την κατηγορία κατάταξης του έργου διαφοροποιούνται και οι απαιτήσεις της περιβαλλοντικής αδειοδότησης, με τα έργα της κατηγορίας Α να υπόκεινται σε διαδικασία περιβαλλοντικής αξιολόγησης και έκδοση Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων, ενώ για τα έργα της κατηγορίας Β προβλέπεται υπαγωγή σε Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις.

Η περιβαλλοντική διάσταση είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στην περίπτωση των αιολικών εγκαταστάσεων, δεδομένου ότι η θέση τους μπορεί να επηρεάζει τη βιοποικιλότητα, την ορνιθοπανίδα, το τοπίο, τα προστατευόμενα οικοσυστήματα και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Το νέο ΕΧΠ-ΑΠΕ προβλέπει ότι, στις περιπτώσεις όπου δεν έχει

θεσπίζεται ειδικό κανονιστικό πλαίσιο προστασίας ούτε υφίσταται εγκεκριμένη Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη, η αξιολόγηση των επιπτώσεων και η διαδικασία χωροθέτησης πραγματοποιούνται σύμφωνα με το άρθρο 10 του Ν. 4014/2011, εφόσον συντρέχουν οι σχετικές προϋποθέσεις.

Το αδειοδοτικό σύστημα των έργων ΑΠΕ έχει παράλληλα αναμορφωθεί μέσω μεταγενέστερων νομοθετικών παρεμβάσεων. Ο Ν. 4685/2020 εισήγαγε μεταβολές στην πρώτη φάση της αδειοδοτικής διαδικασίας, με την αντικατάσταση της Άδειας Παραγωγής από τη Βεβαίωση Παραγωγού, ενώ ο Ν. 4951/2022 συνέχισε τον εκσυγχρονισμό της αδειοδοτικής διαδικασίας και ρύθμισε ζητήματα που αφορούν, μεταξύ άλλων, την παραγωγή, την αποθήκευση και τα συνοδά έργα των εγκαταστάσεων ΑΠΕ.

Συνεπώς, η χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων αποτελεί διαδικασία κατά την οποία αλληλεπιδρούν τεχνικές, χωρικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές παράμετροι. Το νέο ΕΧΠ-ΑΠΕ αναδεικνύει θεσμικά τη σημασία παραγόντων όπως το αιολικό δυναμικό, το υψόμετρο, η σχέση με προστατευόμενες και πολιτιστικά σημαντικές περιοχές, η εγγύτητα σε οικιστικές και τουριστικές χρήσεις, η προσβασιμότητα και η δυνατότητα σύνδεσης με τις ενεργειακές υποδομές. Η ταυτόχρονη συνεκτίμηση παραμέτρων που ενδέχεται να λειτουργούν προς διαφορετικές κατευθύνσεις καθιστά τη χωροθέτηση ένα κατεξοχήν πολυκριτηριακό πρόβλημα και τεκμηριώνει τη χρησιμότητα των μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης που εξετάζονται στη συνέχεια της εργασίας.

2.5 Μεθοδολογίες πολυκριτηριακής αξιολόγησης στη χωροθέτηση

Οι μεθοδολογίες πολυκριτηριακής αξιολόγησης αποτελούν κατάλληλο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων σε σύνθετα προβλήματα χωροθέτησης, καθώς επιτρέπουν τη συστηματική συνεκτίμηση πολλαπλών και συχνά αντικρουόμενων παραμέτρων, όπως το αιολικό δυναμικό, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, η προσβασιμότητα και η εγγύτητα σε υποδομές. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν εφαρμοστεί ευρέως μέθοδοι όπως οι AHP, TOPSIS, ELECTRE και PROMETHEE, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τη λογική αξιολόγησης και κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων (Shao et al., 2020; Abdullah et al., 2025).

Η ενσωμάτωση των μεθόδων αυτών σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) ενισχύει σημαντικά τη διαδικασία ανάλυσης, καθώς επιτρέπει τη χωρική αποτύπωση των δεδομένων και την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται ευκολότερη η κατανόηση των χωρικών διαφοροποιήσεων και η σύγκριση των εναλλακτικών περιοχών σε πραγματικές συνθήκες (Moltames et al., 2022).

Μεταξύ των διαθέσιμων μεθόδων, η PROMETHEE παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς βασίζεται στη σύγκριση των εναλλακτικών μέσω ροών υπεροχής και επιτρέπει τη σαφή αποτύπωση της σχετικής υπεροχής κάθε εναλλακτικής λύσης. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης διαφορετικών συναρτήσεων προτίμησης και η ανάλυση των αποτελεσμάτων μέσω γραφικών εργαλείων ενισχύει τη χρησιμότητά της σε εφαρμογές χωροθέτησης (Josimović et al., 2023).

Ωστόσο, τα αποτελέσματα των πολυκριτηριακών μεθόδων εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τις παραδοχές της ανάλυσης, όπως η επιλογή των κριτηρίων και η στάθμισή τους. Για τον λόγο αυτό, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων απαιτεί κριτική προσέγγιση και εξέταση της ευαισθησίας τους στις επιμέρους μεθοδολογικές επιλογές (Shao et al., 2020).

Με βάση τα παραπάνω, η μέθοδος PROMETHEE αποτελεί κατάλληλη επιλογή για τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών περιοχών βάσει πολλαπλών κριτηρίων, καθώς παρέχει ένα εύελικτο πλαίσιο ενσωμάτωσης διαφορετικών παραμέτρων και προτιμήσεων. Η αξιοποίηση πολυκριτηριακών μεθόδων στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων έχει αποτελέσει αντικείμενο σημαντικού αριθμού ερευνητικών εργασιών, στις οποίες εφαρμόζονται διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις, κριτήρια και τεχνικές στάθμισης.

Για τον λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται αναλυτικότερη βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριότερων σύγχρονων εφαρμογών χωροθέτησης αιολικών πάρκων, τόσο σε διεθνές επίπεδο όσο και στην Ελλάδα, με ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων και γεωχωρικών εργαλείων.

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αποτελεί βασικό μέρος της παρούσας εργασίας, καθώς επιτρέπει την καταγραφή και αξιολόγηση των κυριότερων μεθοδολογικών προσεγγίσεων που έχουν εφαρμοστεί στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων (MCDM) και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για τη συνεκτίμηση τεχνικών, περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων.

Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται αρχικά οι γενικές τάσεις και οι βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις που συναντώνται στη σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται εφαρμογές χωροθέτησης αιολικών πάρκων σε διαφορετικά γεωγραφικά περιβάλλοντα και, ειδικότερα, στην Ελλάδα. Τέλος, πραγματοποιείται σύνθεση των βασικών βιβλιογραφικών ευρημάτων και σύνδεσή τους με τη μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας έρευνας.

3.1 Γενικές τάσεις και μεθοδολογίες στην επιλογή θέσεων αιολικών πάρκων

Η επιλογή κατάλληλων θέσεων για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα των έργων ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο την αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών όσο και τη διάρκεια ζωής τους, αλλά και τα κοινωνικοοικονομικά οφέλη των περιοχών υποδοχής.

Στο πλαίσιο αυτό, η διεθνής βιβλιογραφία έχει στραφεί συστηματικά προς τη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων (MCDM), οι οποίες επιτρέπουν την ταυτόχρονη αξιολόγηση πολλαπλών παραμέτρων. Ενδεικτικά, η μελέτη των Abdullah et al. (2025), μέσα από μια συστηματική ανασκόπηση 30 δημοσιευμένων άρθρων από 16 χώρες, αναδεικνύει τις βασικές τάσεις στον τομέα της χωροθέτησης αιολικών πάρκων. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η Κίνα και το Ιράν παρουσιάζουν αυξημένη

ερευνητική δραστηριότητα, ιδιαίτερα κατά την περίοδο 2020–2024, ενώ καταγράφεται ευρεία χρήση μεθόδων όπως AHP, PROMETHEE και FAHP.

Η αξιοποίηση των μεθόδων αυτών συμβάλλει στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου αξιολόγησης, το οποίο ενσωματώνει τεχνικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια. Παράλληλα, τονίζεται η αυξανόμενη σημασία της ενσωμάτωσης τεχνητής νοημοσύνης, η οποία επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση δυναμικών και μεταβαλλόμενων παραμέτρων, ενισχύοντας την ευελιξία των διαδικασιών χωροθέτησης.

Στο ίδιο πλαίσιο, οι Döker et al. (2025) εξετάζουν τη χωροθέτηση αιολικών πάρκων στην επαρχία Sakarya της Τουρκίας, εφαρμόζοντας συνδυαστικά τη μέθοδο fuzzy AHP και τη σταθμισμένη ασαφή επικάλυψη σε περιβάλλον GIS. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας τόσο στα δεδομένα όσο και στις κρίσεις των ειδικών, οδηγώντας σε πιο ρεαλιστική αποτύπωση της καταλληλότητας των περιοχών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναδεικνύουν συγκεκριμένες περιοχές με υψηλό δυναμικό, επιβεβαιώνοντας τη σημασία της συστηματικής πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Παράλληλα, η μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024) εισάγει ένα πιο σύνθετο μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο συνδυάζει χωρική πολυκριτηριακή ανάλυση με την ανάπτυξη δείκτη συγκρούσεων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συστηματική αποτύπωση αντιτιθέμενων παραμέτρων και τη διαχείριση συγκρούσεων μεταξύ ανταγωνιστικών χρήσεων γης, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την αποδοχή των αποφάσεων από τους εμπλεκόμενους φορείς.

Σε επίπεδο τεχνικών παραμέτρων, οι Asadi & Pourhossein (2021) αναδεικνύουν τη σημασία της έντασης αναταραχής (turbulence intensity), η οποία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο την παραγωγή ενέργειας όσο και τη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών. Η ενσωμάτωσή της σε πολυκριτηριακές αναλύσεις οδηγεί σε διαφοροποιήσεις στην κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων, υπογραμμίζοντας ότι η αξιολόγηση δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο στην ταχύτητα του ανέμου.

Τέλος, οι Josimonić et al. (2023) προτείνουν μια δύο-σταδίων διαδικασία, κατά την οποία αρχικά εφαρμόζονται κριτήρια αποκλεισμού μέσω GIS και στη συνέχεια

πραγματοποιείται κατάταξη των κατάλληλων περιοχών με τη μέθοδο PROMETHEE. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη συστηματικότητα της διαδικασίας και διασφαλίζει τη συμμόρφωση με χωρικούς και κανονιστικούς περιορισμούς.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η επιλογή κατάλληλων θέσεων για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία απαιτεί τη συνδυασμένη αξιολόγηση τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων, συχνά σε συνδυασμό με εργαλεία GIS, επιτρέπει τη συστηματική ενσωμάτωση των παραμέτρων αυτών σε ένα ενιαίο πλαίσιο ανάλυσης, ενισχύοντας την τεκμηρίωση και τη συγκρισιμότητα των εναλλακτικών λύσεων. Παράλληλα, οι διαφοροποιήσεις ως προς την επιλογή των κριτηρίων και τη στάθμισή τους αναδεικνύουν την ανάγκη προσαρμογής της εκάστοτε μεθοδολογίας στις ιδιαίτερες συνθήκες της περιοχής μελέτης (Abdullah et al., 2025; Shao et al., 2020).

Η αποτελεσματικότητα των πολυκριτηριακών προσεγγίσεων συνδέεται, επομένως, άμεσα με το γεωγραφικό και χωρικό πλαίσιο εφαρμογής τους. Για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση εφαρμογών σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, όπου αναδεικνύονται οι επιμέρους χωρικές διαφοροποιήσεις και οι τοπικές συνθήκες που επηρεάζουν τη διαδικασία χωροθέτησης (Manolan Kandy et al., 2024), όπως παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

3.2 Χωροθέτηση αιολικών πάρκων σε ευρύτερο γεωγραφικό πλαίσιο

Η εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων σε ευρύτερη γεωγραφική κλίμακα έχει αναδείξει σημαντικά αποτελέσματα, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή της διαδικασίας χωροθέτησης στις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε περιοχής.

Η εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων σε περιφερειακό επίπεδο έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει την αξιοπιστία των αποφάσεων, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη τις ιδιαίτερες τοπικές συνθήκες. Στη μελέτη των Imam et al. (2024) για τη Σαουδική Αραβία, συνδυάστηκαν γεωγραφικά δεδομένα GIS με τεχνο-κοινωνικο-οικονομικές αναλύσεις και προβλέψεις μέσω μηχανικής μάθησης για τη χωροθέτηση αιολικών και ηλιακών πάρκων. Η ανάλυση κατέδειξε τέσσερις ιδανικές

περιοχές για αιολικά πάρκα, κυρίως στις επαρχίες Al Madinah, Makkah, Riyadh και Eastern, και μία περιοχή για υβριδικά συστήματα, επισημαίνοντας τη σημασία της πολυκριτηριακής αξιολόγησης για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και τη βιωσιμότητα των έργων.

Επιπλέον, η μελέτη αξιολόγησε τη βιωσιμότητα των επενδύσεων, δείχνοντας ότι, αν και οι τρέχουσες τιμές αγοράς δεν καθιστούν όλα τα έργα άμεσα οικονομικά βιώσιμα, η υιοθέτηση κατάλληλων πολιτικών μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ανάπτυξη ΑΠΕ. Η εφαρμογή GIS σε συνδυασμό με πολυκριτηριακές μεθόδους επέτρεψε την παραγωγή ρεαλιστικών χαρτών καταλληλότητας, ενισχύοντας τη στρατηγική χωρική ανάλυση και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Η μελέτη των Placide & Lollchund (2024) αξιοποιεί εργαλεία Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) σε συνδυασμό με μεθόδους ασαφούς λογικής για τον εντοπισμό των βέλτιστων θέσεων αιολικών πάρκων στο Μπουρούντι, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ταχύτητα ανέμου, η κλίση του εδάφους, η εγγύτητα σε δίκτυα και δρόμους, καθώς και οι χρήσεις γης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αντιμετώπιση αβεβαιότητας και την παραγωγή ρεαλιστικών χαρτών καταλληλότητας, ενώ δείχνει ότι μόνο το 1,96% της περιοχής είναι εξαιρετικά κατάλληλο για εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Η μελέτη καταδεικνύει επίσης τη σημασία γεωγραφικής και τεχνικής προσαρμογής στις τοπικές συνθήκες, προσφέροντας ένα πρακτικό πλαίσιο για στρατηγικό σχεδιασμό αιολικών πάρκων σε περιοχές με περιορισμένα δεδομένα.

Οι Amsharuk & Łaska (2024) παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την Πολωνία, συνδυάζοντας AHP, TOPSIS και GIS, προκειμένου να εντοπίσουν νέες θέσεις για αιολικά πάρκα. Η ανάλυση έδειξε ότι περίπου 2,34% της χώρας διαθέτει περιοχές με σημαντικές δυνατότητες ανάπτυξης, καλύπτοντας συνολικά 7.555,91 km². Η ενσωμάτωση πολυκριτηριακών τεχνικών με χωρική ανάλυση επιτρέπει την αναγνώριση περιοχών υψηλής καταλληλότητας και παρέχει ένα επαναχρησιμοποιήσιμο πλαίσιο για περιφερειακό σχεδιασμό και στρατηγική ανάπτυξη ΑΠΕ, ενισχύοντας την αποδοχή από επενδυτές και φορείς χάραξης πολιτικής.

Στη Λιβύη, η μελέτη των Badi et al. (2023) αξιοποίησε ένα συνδυασμένο πολυκριτηριακό μοντέλο BWM-AHP-MARCOS για την επιλογή βέλτιστων θέσεων αιολικών πάρκων. Το μοντέλο αυτό επέτρεψε τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων με ακρίβεια και την κατάταξη των προτεινόμενων περιοχών, με την πόλη Derna να αναδεικνύεται ως η πλέον κατάλληλη με δείκτη 0,703. Η μεθοδολογία επέτρεψε επίσης ανάλυση ευαισθησίας, δείχνοντας τη σταθερότητα των αποτελεσμάτων έναντι αλλαγών στα κριτήρια, υπογραμμίζοντας τη σημασία της πολυκριτηριακής προσέγγισης στην επίτευξη αξιόπιστων αποφάσεων για περιοχές που εξαρτώνται ακόμα από ορυκτά καύσιμα.

Οι Albraheem & AlAwlaqi (2023) διερεύνησαν την καταλληλότητα περιοχών στη Σαουδική Αραβία χρησιμοποιώντας AHP και GIS, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά, οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Το αποτέλεσμα ήταν η παραγωγή χαρτών καταλληλότητας με τέσσερις κατηγορίες, όπου οι περιοχές υψηλής καταλληλότητας (class 4) κάλυπταν 14.553,57 km² στην Al Mantiqah Al Sharqiyah και οι class 3 περιοχές 65.989,5 km² στη Riyadh. Η ανάλυση απέδειξε ότι η χωρική ολοκλήρωση πολυκριτηριακών κριτηρίων είναι κρίσιμη για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, ενώ παρέχει ένα πρακτικό εργαλείο υποστήριξης σχεδιασμού σε περιφερειακό επίπεδο.

Τέλος, η μελέτη των Moradi et al. (2020) στην επαρχία Alborz του Ιράν ανέδειξε ότι το 20% της περιοχής είναι κατάλληλο για ανάπτυξη αιολικών πάρκων, με τη νότια και νοτιοανατολική περιοχή να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα. Η εφαρμογή MCDM σε συνδυασμό με GIS επέτρεψε την αξιολόγηση τεχνικών, τοπογραφικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων, ενώ η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι η απουσία συγκεκριμένων κριτηρίων, όπως η εγγύτητα σε δίκτυα, επηρεάζει την κατανομή της διαθέσιμης γης. Η μελέτη καταδεικνύει τη σημασία της συστηματικής εφαρμογής πολυκριτηριακών διαδικασιών στη διαχείριση χώρου και την υποστήριξη αποφάσεων για περιφερειακά έργα αιολικής ενέργειας.

Οι παραπάνω μελέτες καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων σε συνδυασμό με χωρικές αναλύσεις αποτελεί πλέον βασικό εργαλείο για τη χωρική αξιολόγηση αιολικών πάρκων σε διεθνές επίπεδο. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων

ενισχύεται μέσω της ενσωμάτωσης διαφορετικών τύπων δεδομένων και της δυνατότητας αποτύπωσης της καταλληλότητας σε χωρική μορφή. Ωστόσο, διαπιστώνεται ότι η αποτελεσματικότητα των προσεγγίσεων αυτών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, όπως οι γεωμορφολογικές συνθήκες, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί και το θεσμικό πλαίσιο.

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων στην Ελλάδα, όπου οι έντονες γεωγραφικές διαφοροποιήσεις και η ύπαρξη εκτεταμένων προστατευόμενων περιοχών επηρεάζουν καθοριστικά τη διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής θέσεων για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

3.3 Χωροθέτηση αιολικών πάρκων στην Ελλάδα

Η εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων στην Ελλάδα έχει μελετηθεί εκτενώς, εστιάζοντας τόσο στις χερσαίες όσο και στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Αρχικά, η μελέτη των Bertsiou et al. (2025) συνδύασε τα εργαλεία Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) με πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων (MCDM) για την εκτίμηση της καταλληλότητας τόσο για ανεμογεννήτριες όσο και για φωτοβολταϊκά σε ένα μικρό νησιωτικό περιβάλλον (Κάρπαθος).

Η χρήση της μεθόδου Weighted Linear Combination επιτρέπει την αξιολόγηση όλων των σχετικών κριτηρίων καταλληλότητας, όπως οι ζώνες αποκλεισμού και άλλοι περιορισμοί, και την κατάταξη των περιοχών σε διαφορετικά επίπεδα καταλληλότητας για εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικής έκτασης είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εγκατάσταση, υπογραμμίζοντας τις δυσκολίες εύρεσης κατάλληλων περιοχών σε περιοχές με περιορισμούς και ανάγκες για αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ. Παράλληλα, η ευαισθησία των αποτελεσμάτων ως προς τα κριτήρια έδειξε τη σημασία της ισορροπημένης κατανομής βαρών στην αξιολόγηση.

Η μέθοδος αυτή συνδέεται με την έρευνα των Dimitriou et al. (2025), που ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την επιλογή θέσεων υπεράκτιων αιολικών πάρκων (OWFs) στην Ελλάδα, συνδυάζοντας MCDM και GIS, με χρήση AHP για τον

καθορισμό βαρών και την επέκταση της μεθόδου VIKOR για την αντιμετώπιση αβεβαιότητας στις τιμές και στα κριτήρια.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε 35 υπεράκτια σημεία, όπως νότια της Αλεξανδρούπολης, ανατολικά του Ξερόκαμπου Κρήτης και κοντά στον Κόλπο Πατρών, κατέδειξε τις πλέον προτιμητέες θέσεις για εγκατάσταση, ενσωματώνοντας διαφορετικές απόψεις των φορέων λήψης αποφάσεων. Το πλαίσιο αυτό αποτελεί καινοτομία για τη χώρα, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή της μεθοδολογίας σε άλλες περιοχές και την ενίσχυση της βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης σε υπεράκτιο επίπεδο. Η προσέγγιση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της πολυκριτηριακής ανάλυσης και σε υπεράκτια περιβάλλοντα, όπου οι χωρικοί και τεχνικοί περιορισμοί διαφοροποιούνται σημαντικά σε σχέση με τις χερσαίες εγκαταστάσεις.

Στην περίπτωση των χερσαίων αιολικών πάρκων, η μελέτη των Karamountzou & Vagiona (2023) επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της καταλληλότητας και της βιωσιμότητας των υπαρχόντων εγκαταστάσεων. Χρησιμοποιώντας GIS σε συνδυασμό με πολυκριτηριακή ανάλυση μέσω AHP και TOPSIS, οι συγγραφείς ανέλυσαν επτά κριτήρια αποκλεισμού και εννέα περιβαλλοντικά, τεχνικο-οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια για την εκτίμηση βιωσιμότητας σε πέντε διαφορετικά σενάρια.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το 81,4% των υπαρχόντων πάρκων βρίσκονται σε κατάλληλες περιοχές, ενώ τα κυριότερα προβλήματα καταλληλότητας αφορούν εγκαταστάσεις εντός των ορίων των προστατευόμενων περιοχών Natura 2000. Επιπλέον, εντοπίστηκαν περιοχές στην Πελοπόννησο και στα όρια της Αττικής που χαρακτηρίζονται ως ιδανικές σε περισσότερα σενάρια, υπογραμμίζοντας τη σημασία της ορθής χωροθέτησης για τη βιώσιμη ανάπτυξη ΑΠΕ. Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι, ακόμη και σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις, η καταλληλότητα των θέσεων δεν είναι δεδομένη, αλλά εξαρτάται από τη συνεκτίμηση πολλαπλών παραμέτρων και περιορισμών.

Στο ίδιο πλαίσιο, η μελέτη των Vagiona & Kamilakis (2018) ανέδειξε μια μεθοδολογία για τη βιώσιμη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο Νότιο Αιγαίο, εφαρμόζοντας GIS σε συνδυασμό με MCDM (AHP και TOPSIS). Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει τεχνικά, χωρικά, οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο εργαλείο λήψης αποφάσεων σε περιφερειακό επίπεδο.

Τα αποτελέσματα υποστηρίζουν τη στρατηγική ανάπτυξη ΑΠΕ και την υιοθέτηση βιώσιμων πολιτικών, ενώ επιτρέπουν την αναπαραγωγή της μεθοδολογίας σε άλλες περιοχές με αντίστοιχα χαρακτηριστικά.

Η περιφερειακή διάσταση της αξιολόγησης αναδεικνύεται και στη μελέτη των Latinopoulos & Kechagia (2015), που πρότειναν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο GIS + MCDM για την επιλογή κατάλληλων περιοχών αιολικών πάρκων σε ελληνική περιφέρεια. Η διαδικασία αξιολόγησης περιλάμβανε τεχνολογικά, οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως περιορισμοί ή παράγοντες αξιολόγησης για τον εντοπισμό των κατάλληλων περιοχών και την εκτίμηση αυτών μέσω ενός Σύνθετου Δείκτη Καταλληλότητας (Suitability Index). Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία της μεθοδολογίας για τον εντοπισμό βέλτιστων θέσεων για μελλοντικά έργα και την αξιολόγηση ήδη αδειοδοτημένων πάρκων, υποστηρίζοντας την παρέμβαση των σχεδιαστών και των πολιτικών στην καθοδήγηση της ανάπτυξης ΑΠΕ.

Τέλος, η έρευνα των Tsoutsos et al. (2015) στην Κρήτη ανέπτυξε μια μεθοδολογία για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση και ιεράρχηση περιοχών κατάλληλων για μεγάλα αιολικά πάρκα, εφαρμόζοντας GIS σε συνδυασμό με ευέλικτη πολυκριτηριακή ανάλυση και το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης ΑΠΕ.

Η προσέγγιση αυτή παρέχει μια αντικειμενική και ρεαλιστική επισκόπηση των ζητημάτων χωροθέτησης, ενισχύει τους περιφερειακούς και εθνικούς φορείς λήψης αποφάσεων και υποστηρίζει στρατηγικές αειφόρου ανάπτυξης, αποφεύγοντας κατακερματισμένες αποφάσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συστηματική και ολοκληρωμένη αξιολόγηση των περιοχών μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στον στρατηγικό χωρικό σχεδιασμό και την ανάπτυξη βιώσιμων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα.

Οι παραπάνω μελέτες καταδεικνύουν ότι η χωροθέτηση αιολικών πάρκων στην Ελλάδα βασίζεται σε ολοκληρωμένες πολυκριτηριακές προσεγγίσεις, οι οποίες ενσωματώνουν τεχνικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και χωρικά κριτήρια. Η συνδυαστική χρήση GIS και MCDM αποτελεί κυρίαρχη μεθοδολογική προσέγγιση,

καθώς επιτρέπει τη συστηματική αξιολόγηση και σύγκριση εναλλακτικών περιοχών. Παράλληλα, η καταλληλότητα των θέσεων επηρεάζεται σημαντικά από τις ιδιαίτερες συνθήκες του ελληνικού χώρου, όπως η έντονη τοπογραφία, η νησιωτικότητα, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί και η ύπαρξη εκτεταμένων προστατευόμενων περιοχών.

Τα ευρήματα αυτά αναδεικνύουν την ανάγκη προσαρμογής των μεθοδολογικών προσεγγίσεων στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των διεθνών μελετών που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, διαμορφώνουν ένα ευρύτερο πλαίσιο για τη σύγκριση των μεθόδων, των κριτηρίων και των διαδικασιών αξιολόγησης που εφαρμόζονται στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων. Η σύνθεση των παραπάνω βιβλιογραφικών ευρημάτων και η σύνδεσή τους με τη μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας έρευνας παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

3.4 Σύνθεση της βιβλιογραφίας και σύνδεση με την παρούσα έρευνα

Η σύγκριση των μελετών που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες αναδεικνύει ορισμένες κοινές τάσεις ως προς τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις που εφαρμόζονται στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων. Ιδιαίτερα συχνή είναι η συνδυαστική χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, ενώ σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται ως προς την επιλογή των κριτηρίων, τη στάθμισή τους και τη διαδικασία κατάταξης των εναλλακτικών θέσεων (Shao et al., 2020; Abdullah et al., 2025). Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σκοπό της εκάστοτε μελέτης, τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των δεδομένων, καθώς και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής εφαρμογής.

Ως προς τις πολυκριτηριακές μεθόδους, δεν προκύπτει μία ενιαία προσέγγιση που να υπερσχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Μέθοδοι όπως η AHP, η TOPSIS, η VIKOR, η PROMETHEE και οι τεχνικές ασαφούς λογικής χρησιμοποιούνται είτε αυτοτελώς είτε συνδυαστικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Η AHP χρησιμοποιείται συχνά για τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων, ενώ άλλες μέθοδοι

επικεντρώνονται περισσότερο στην αξιολόγηση και την τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Η ύπαρξη διαφορετικών προσεγγίσεων επιβεβαιώνει ότι η πολυκριτηριακή αξιολόγηση δεν αποτελεί μία τυποποιημένη διαδικασία, αλλά ένα ευέλικτο πλαίσιο που προσαρμόζεται στις ανάγκες κάθε εφαρμογής (Moltames et al., 2022; Abdullah et al., 2025).

Κοινό στοιχείο της πλειονότητας των εξεταζόμενων μελετών αποτελεί η αξιοποίηση των GIS ως βασικού εργαλείου χωρικής ανάλυσης. Τα GIS χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση, οργάνωση και επεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων, την εφαρμογή ζωνών αποκλεισμού, τον εντοπισμό περιοχών που πληρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις και την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας. Η συνδυαστική χρήση GIS και MCDM επιτρέπει, επομένως, τη σύνδεση της χωρικής πληροφορίας με τη διαδικασία αξιολόγησης, μετατρέποντας διαφορετικές κατηγορίες δεδομένων σε ένα ενιαίο πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων. Η προσέγγιση αυτή εμφανίζεται τόσο σε διεθνείς εφαρμογές όσο και σε μελέτες που αφορούν τον ελληνικό χώρο (Latinopoulos & Kechagia, 2015; Josimović et al., 2023; Bertsiou et al., 2025).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει επίσης η επιλογή των κριτηρίων αξιολόγησης. Παρότι ορισμένα κριτήρια, όπως το αιολικό δυναμικό, η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο, η προσβασιμότητα, η κλίση του εδάφους και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, εμφανίζονται συστηματικά στη βιβλιογραφία, δεν χρησιμοποιούνται πάντοτε με τον ίδιο τρόπο ούτε με την ίδια σχετική βαρύτητα. Σε ορισμένες μελέτες μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά, ενώ σε άλλες ενισχύεται ο ρόλος των περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η διαφορετική στάθμιση των κριτηρίων μπορεί να μεταβάλει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα και την κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την προσεκτική αιτιολόγηση των βαρών και, όπου είναι δυνατόν, την εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας (Moradi et al., 2020; Manolan Kandy et al., 2024).

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδεικνύει ακόμη τη σημασία της αβεβαιότητας και των πιθανών συγκρούσεων μεταξύ των κριτηρίων. Μία περιοχή μπορεί, για παράδειγμα, να παρουσιάζει υψηλό αιολικό δυναμικό και ταυτόχρονα σημαντικούς περιβαλλοντικούς περιορισμούς ή αυξημένες απαιτήσεις ως προς την πρόσβαση και τη σύνδεση με το δίκτυο. Αντίστοιχα, η επιλογή μιας περιοχής με μικρότερη τεχνική

καταλληλότητα μπορεί να ευνοείται όταν παρουσιάζει λιγότερους κοινωνικούς ή περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Οι διαφοροποιήσεις αυτές εξηγούν γιατί οι σύγχρονες προσεγγίσεις στρέφονται ολοένα περισσότερο σε μεθόδους που επιτρέπουν τη συνεκτίμηση αντικρουόμενων στόχων και την εξέταση εναλλακτικών σεναρίων (Manolan Kandy et al., 2024).

Σημαντικές διαφοροποιήσεις διαπιστώνονται και ως προς το γεωγραφικό πλαίσιο εφαρμογής. Οι διεθνείς μελέτες δείχνουν ότι οι κατάλληλες παράμετροι και τα όρια αποδοχής τους εξαρτώνται από τις τοπικές μορφολογικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και θεσμικές συνθήκες. Η ίδια μεθοδολογία μπορεί επομένως να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται σε μια εκτεταμένη ηπειρωτική περιοχή, σε ένα νησιωτικό περιβάλλον ή σε μια περιοχή με αυξημένους περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την Ελλάδα, όπου η έντονη μορφολογία του εδάφους, η νησιωτικότητα, η μεγάλη ποικιλία χρήσεων γης και η παρουσία προστατευόμενων περιοχών επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία επιλογής κατάλληλων θέσεων (Tsoutsos et al., 2015; Karamountzou & Vagiona, 2023).

Οι ελληνικές μελέτες επιβεβαιώνουν σε μεγάλο βαθμό τις διεθνείς τάσεις, αλλά ταυτόχρονα αναδεικνύουν την ανάγκη προσαρμογής των γενικών μεθοδολογικών πλαισίων στις ιδιαίτερες συνθήκες του ελληνικού χώρου. Η εφαρμογή συνδυαστικών προσεγγίσεων GIS και MCDM εμφανίζεται τόσο σε χερσαίες όσο και σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε περιβαλλοντικούς και χωροταξικούς περιορισμούς, στις προστατευόμενες περιοχές και στη μορφολογία του εδάφους. Παράλληλα, η εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων, όπως AHP, TOPSIS, VIKOR και σύνθετοι δείκτες καταλληλότητας, καταδεικνύει ότι η επιλογή της τεχνικής αξιολόγησης διαφοροποιείται ανάλογα με τον στόχο και την κλίμακα κάθε μελέτης.

Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται και η παρούσα έρευνα. Η επιλογή της μεθόδου PROMETHEE επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών περιοχών με βάση πολλαπλά και διαφορετικής φύσης κριτήρια, χωρίς να περιορίζεται η ανάλυση σε έναν μόνο δείκτη καταλληλότητας. Η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης των εναλλακτικών μέσω σχέσεων υπεροχής και επιτρέπει την εξέταση του τρόπου με τον οποίο οι επιδόσεις στα επιμέρους κριτήρια επηρεάζουν την τελική κατάταξη.

Η εφαρμογή της σε προβλήματα χωροθέτησης αιολικών πάρκων έχει ήδη παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με χωρικά δεδομένα και GIS (Josimović et al., 2023).

Η παρούσα προσέγγιση διαφοροποιείται επιπλέον ως προς τη συγκριτική αξιολόγηση περιοχών με διαφορετικά γεωμορφολογικά και χωρικά χαρακτηριστικά. Η εξέταση εναλλακτικών θέσεων στην Κρήτη επιτρέπει να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο παράγοντες όπως το αιολικό δυναμικό, η μορφολογία του εδάφους, η πρόσβαση σε υποδομές και οι περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί περιορισμοί αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν την τελική κατάταξη. Με τον τρόπο αυτό, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται μόνο στον εντοπισμό της καταλληλότερης περιοχής, αλλά επιτρέπει και την καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που διαμορφώνουν το αποτέλεσμα της πολυκριτηριακής διαδικασίας.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά, τέλος, η διερεύνηση της επίδρασης της στάθμισης των κριτηρίων και των παραμέτρων της μεθόδου. Η εξέταση διαφορετικών σεναρίων και η ανάλυση ευαισθησίας επιτρέπουν να αξιολογηθεί κατά πόσο η τελική κατάταξη παραμένει σταθερή όταν μεταβάλλονται οι προτεραιότητες της ανάλυσης. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με τα ευρήματα της βιβλιογραφίας, σύμφωνα με τα οποία η στάθμιση των κριτηρίων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα των πολυκριτηριακών μοντέλων.

Συνολικά, η παρούσα έρευνα αξιοποιεί τις βασικές κατευθύνσεις που προκύπτουν από τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία, προσαρμόζοντάς τες στο συγκεκριμένο γεωγραφικό πλαίσιο της Κρήτης. Η χρήση πολυκριτηριακής αξιολόγησης, η συνεκτίμηση διαφορετικών κατηγοριών κριτηρίων, η αξιοποίηση γεωχωρικών δεδομένων και η διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων συνθέτουν ένα πλαίσιο που επιτρέπει όχι μόνο την κατάταξη των εξεταζόμενων περιοχών, αλλά και την ερμηνεία των παραγόντων που καθορίζουν την τελική επιλογή.

4. Πολυκριτηριακές Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων και η Μέθοδος PROMETHEE

Η χωροθέτηση αιολικών πάρκων αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία λήψης αποφάσεων, η οποία επηρεάζεται από πληθώρα παραμέτρων που σχετίζονται με το φυσικό περιβάλλον, τις τεχνικές απαιτήσεις των εγκαταστάσεων, καθώς και τις κοινωνικο-οικονομικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά αναγκαία τη χρήση μεθοδολογικών εργαλείων ικανών να ενσωματώνουν και να αξιολογούν ταυτόχρονα διαφορετικά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια.

Στο πλαίσιο αυτό, η πολυκριτηριακή ανάλυση λήψης αποφάσεων, σε συνδυασμό με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), αποτελεί μία ευρέως εφαρμοζόμενη προσέγγιση στη διεθνή βιβλιογραφία για την υποστήριξη προβλημάτων χωρικού σχεδιασμού και ενεργειακής χωροθέτησης. Η αξιοποίηση των GIS επιτρέπει τη διαχείριση και ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων, καθώς και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω θεματικών χαρτών, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Josimović et al., 2023).

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό και μεθοδολογικό υπόβαθρο της πολυκριτηριακής ανάλυσης, με έμφαση στις μεθόδους που εφαρμόζονται στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων. Αρχικά, αναλύονται οι βασικές έννοιες της πολυκριτηριακής ανάλυσης, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία. Ακολουθεί η διερεύνηση εφαρμογών των μεθόδων αυτών στον τομέα της αιολικής ενέργειας, προκειμένου να τεκμηριωθεί η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης. Τέλος, παρουσιάζεται η μέθοδος PROMETHEE και το λογισμικό Visual PROMETHEE, το οποίο χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της πολυκριτηριακής αξιολόγησης στην παρούσα εργασία.

4.1 Θεμελιώδεις έννοιες πολυκριτηριακής ανάλυσης

Η πολυκριτηριακή ανάλυση λήψης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA) αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθοδολογικές προσεγγίσεις για

την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων, στα οποία εμπλέκονται πολλαπλά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια. Η ανάγκη για την εφαρμογή της προκύπτει κυρίως σε περιπτώσεις όπου η επιλογή μιας βέλτιστης λύσης δεν μπορεί να βασιστεί σε ένα μόνο κριτήριο, αλλά απαιτεί την ταυτόχρονη συνεκτίμηση τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων, όπως συμβαίνει χαρακτηριστικά στη χωροθέτηση ενεργειακών έργων (Bertsiou et al., 2025).

Στο πλαίσιο της πολυκριτηριακής ανάλυσης, κάθε πρόβλημα λήψης απόφασης διατυπώνεται ως ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων, οι οποίες αξιολογούνται βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων. Τα κριτήρια αυτά εκφράζουν τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την καταλληλότητα μιας επιλογής και μπορεί να είναι ποσοτικά ή ποιοτικά. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συνδυαστική αξιολόγηση των εναλλακτικών, ενσωματώνοντας τόσο ποσοτικά δεδομένα όσο και ποιοτικές εκτιμήσεις (Josimović et al., 2023).

Βασικά στοιχεία της MCDA αποτελούν οι εναλλακτικές λύσεις, τα κριτήρια αξιολόγησης και τα βάρη των κριτηρίων. Οι εναλλακτικές αντιστοιχούν στις υποψήφιες επιλογές που εξετάζονται, ενώ τα κριτήρια καθορίζουν τις διαστάσεις της αξιολόγησης. Τα βάρη εκφράζουν τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου στη διαδικασία λήψης απόφασης και επηρεάζουν καθοριστικά το τελικό αποτέλεσμα, καθώς καθορίζουν τον βαθμό συμβολής κάθε παραμέτρου στην τελική αξιολόγηση (Josimović et al., 2023).

Ιδιαίτερη σημασία στη διαδικασία της πολυκριτηριακής ανάλυσης έχει η διάκριση μεταξύ κριτηρίων μεγιστοποίησης και ελαχιστοποίησης. Στα κριτήρια μεγιστοποίησης, υψηλότερες τιμές υποδηλώνουν μεγαλύτερη καταλληλότητα, όπως στην περίπτωση του αιολικού δυναμικού ή της απόστασης από οικισμούς και προστατευόμενες περιοχές, ενώ στα κριτήρια ελαχιστοποίησης επιδιώκονται χαμηλότερες τιμές, όπως στην απόσταση από το οδικό δίκτυο ή τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η σωστή κατηγοριοποίηση των κριτηρίων είναι κρίσιμη για την εφαρμογή των μεθόδων αξιολόγησης και επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Bertsiou et al., 2025).

Η εφαρμογή της MCDA ακολουθεί μία συστηματική διαδικασία που περιλαμβάνει τον ορισμό του προβλήματος, την επιλογή των εναλλακτικών λύσεων, τον καθορισμό των κριτηρίων και των βαρών τους, καθώς και την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων αξιολόγησης. Στο πλαίσιο αυτό, η ενσωμάτωση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) έχει καταστεί ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει τη διαχείριση και ανάλυση χωρικών δεδομένων, καθώς και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω θεματικών χαρτών (Josimović et al., 2023).

Η συνδυασμένη χρήση MCDA και GIS παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση σύνθετων χωρικών προβλημάτων, επιτρέποντας την ενσωμάτωση πολλαπλών θεματικών επιπέδων (layers) και την αξιολόγηση της καταλληλότητας των περιοχών με βάση διαφορετικά κριτήρια. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική στον τομέα του ενεργειακού σχεδιασμού, όπου απαιτείται η ταυτόχρονη συνεκτίμηση τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων (Bertsiou et al., 2025).

Τέλος, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπως η δυνατότητα ενσωμάτωσης ετερογενών δεδομένων και η υποστήριξη πολύπλοκων αποφάσεων, η εφαρμογή της συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις. Η σημαντικότερη αφορά την υποκειμενικότητα στον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων, καθώς αυτά βασίζονται συχνά στην εμπειρία και την κρίση των ειδικών. Όπως επισημαίνεται, η διαδικασία στάθμισης των κριτηρίων δεν είναι πλήρως αντικειμενική και μπορεί να επηρεάσει τα τελικά αποτελέσματα της αξιολόγησης (Josimović et al., 2023).

Η πολυκριτηριακή ανάλυση, όπως παρουσιάστηκε, αποτελεί ένα ευέλικτο και ισχυρό εργαλείο για την υποστήριξη σύνθετων διαδικασιών λήψης αποφάσεων, ιδιαίτερα σε χωρικά προβλήματα όπως η χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων. Ωστόσο, η εφαρμογή της δεν περιορίζεται σε μία ενιαία μεθοδολογική προσέγγιση, αλλά περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τεχνικών και μεθόδων, καθεμία από τις οποίες παρουσιάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί πολυάριθμες μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπως η AHP, η ELECTRE, η TOPSIS και η

PROMETHEE, οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με εργαλεία GIS για την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων (Josimović et al., 2023). Στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότερες από αυτές τις μεθόδους, με έμφαση στα κύρια χαρακτηριστικά τους και στη συμβολή τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

4.2 Βασικές μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης για την υποστήριξη σύνθετων διαδικασιών λήψης αποφάσεων, ιδιαίτερα σε προβλήματα χωρικού σχεδιασμού και χωροθέτησης ενεργειακών έργων. Οι μέθοδοι αυτές διαφοροποιούνται ως προς τη μαθηματική τους προσέγγιση, τον τρόπο ενσωμάτωσης των προτιμήσεων του αποφασίζοντος και τη διαδικασία κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων. Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων συγκαταλέγονται η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP), οι μέθοδοι υπεροχής (outranking methods) όπως η ELECTRE και η PROMETHEE, καθώς και οι μέθοδοι βασισμένες στην ιδανική λύση, όπως η TOPSIS (Josimović et al., 2023).

Μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους είναι η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process – AHP), η οποία βασίζεται στη διάσπαση ενός προβλήματος σε ιεραρχικά επίπεδα και στη σύγκριση των κριτηρίων ανά ζεύγη. Η μέθοδος επιτρέπει τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων με τρόπο συστηματικό και διαφανή, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές σε περιβάλλον GIS και ενεργειακό σχεδιασμό. Στην πράξη, η AHP χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με χωρικά δεδομένα για την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας, όπως επισημαίνεται και σε σχετικές εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης σε ενεργειακά έργα (Bertsiou et al., 2025).

Ωστόσο, η AHP παρουσιάζει και περιορισμούς, καθώς βασίζεται σε υποκειμενικές εκτιμήσεις κατά τη διαδικασία των συγκρίσεων ανά ζεύγη, γεγονός που μπορεί να εισάγει αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, σε πιο σύνθετα

προβλήματα χρησιμοποιούνται συχνά μέθοδοι υπεροχής (outranking methods), οι οποίες επιτρέπουν την πιο ευέλικτη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι ELECTRE και PROMETHEE, οι οποίες βασίζονται στη σύγκριση εναλλακτικών ανά ζεύγη και στον προσδιορισμό σχέσεων υπεροχής μεταξύ τους. Οι μέθοδοι αυτές δεν επιδιώκουν απαραίτητα την εύρεση μιας μοναδικής βέλτιστης λύσης, αλλά επιτρέπουν τη μερική ή πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές μεταξύ τους ως προς τα επιμέρους κριτήρια (Josimović et al., 2023).

Η μέθοδος PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους υπεροχής, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα χωροθέτησης αιολικών πάρκων. Η βασική της αρχή είναι η σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων μέσω συναρτήσεων προτίμησης και ο υπολογισμός θετικών και αρνητικών ροών υπεροχής, οι οποίες οδηγούν στην κατάταξη των επιλογών. Η μέθοδος αυτή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα ενσωμάτωσης τόσο ποσοτικών όσο και ποιοτικών κριτηρίων, καθώς και η ευελιξία στην προσαρμογή των προτιμήσεων του αποφασίζοντα (Josimović et al., 2023).

Παράλληλα, ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι και η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), η οποία βασίζεται στην έννοια της ιδανικής και της αντι-ιδανικής λύσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η βέλτιστη εναλλακτική είναι εκείνη που βρίσκεται πλησιέστερα στην ιδανική λύση και ταυτόχρονα πιο μακριά από τη χειρότερη δυνατή επιλογή. Η TOPSIS χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης και με εργαλεία GIS για την αξιολόγηση χωρικών δεδομένων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές ενεργειακού σχεδιασμού (Bertsiou et al., 2025).

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία παρατηρείται επίσης η τάση συνδυασμού διαφορετικών μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης, με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να περιλαμβάνει, για παράδειγμα, τη χρήση της AHP για τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων και την εφαρμογή της PROMETHEE ή της TOPSIS για την τελική κατάταξη των εναλλακτικών. Η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα κάθε μεθόδου και περιορίζει τις

αδυναμίες τους, προσφέροντας ένα πιο ολοκληρωμένο πλαίσιο ανάλυσης (Bertsiou et al., 2025; Josimović et al., 2023).

Συνολικά, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος, τα διαθέσιμα δεδομένα και τον βαθμό πολυπλοκότητας της ανάλυσης. Στην περίπτωση της χωροθέτησης αιολικών πάρκων, οι μέθοδοι υπεροχής, και ειδικότερα η PROMETHEE, θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλες, καθώς επιτρέπουν την αποτελεσματική σύγκριση εναλλακτικών θέσεων και την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε περιβάλλον πολλαπλών κριτηρίων.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή των μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης έχει οδηγήσει στη δημιουργία ενός ευρέος φάσματος εργαλείων, τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά προβλήματα λήψης αποφάσεων και επίπεδα ανάλυσης. Στον τομέα της αιολικής ενέργειας, οι μέθοδοι αυτές αξιοποιούνται εκτενώς για τη συστηματική αξιολόγηση υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης, σε συνδυασμό με χωρικά δεδομένα και εργαλεία GIS. Όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, τη διαθεσιμότητα δεδομένων και τους στόχους της ανάλυσης, ενώ συχνά εφαρμόζονται συνδυαστικά περισσότερες της μίας τεχνικές (Bertsiou et al., 2025; Josimović et al., 2023).

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εφαρμογές των πολυκριτηριακών μεθόδων στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων, οι οποίες αναδεικνύουν τόσο τη λειτουργικότητα όσο και την αποτελεσματικότητά τους σε πραγματικές συνθήκες, και εξετάζονται αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο.

4.3 Εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων

Η εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων παρουσιάζεται εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία μέσω εμπειρικών μελετών που αξιολογούν την καταλληλότητα διαφορετικών περιοχών εγκατάστασης. Οι μελέτες

αυτές εστιάζουν στην πρακτική αξιοποίηση των μεθοδολογιών, αναδεικνύοντας τη λειτουργικότητά τους σε πραγματικά προβλήματα χωρικού σχεδιασμού.

Στην εργασία των Josimović et al. (2023), προτείνεται μία ολοκληρωμένη διαδικασία χωροθέτησης, η οποία περιλαμβάνει τον αρχικό αποκλεισμό ακατάλληλων περιοχών και την επακόλουθη αξιολόγηση των υποψήφιων θέσεων μέσω της μεθόδου PROMETHEE. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε πραγματική περιοχή μελέτης καταδεικνύει ότι η διαδοχική αυτή προσέγγιση επιτρέπει τη σημαντική μείωση του πλήθους των εναλλακτικών και οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα κατάταξης.

Αντίστοιχα, οι Moradi et al. (2020) εφαρμόζουν πολυκριτηριακή ανάλυση για τη χωροθέτηση αιολικών πάρκων σε περιβάλλον GIS, αξιολογώντας διαφορετικές περιοχές με βάση ένα σύνολο χωρικών και τεχνικών κριτηρίων. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους δείχνουν ότι η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον σαφή διαχωρισμό των περιοχών υψηλής και χαμηλής καταλληλότητας, συμβάλλοντας στη βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Σε άλλη εφαρμογή, οι Albraheem & AlAwlaqi (2023) χρησιμοποιούν τη μέθοδο AHP για την αξιολόγηση της καταλληλότητας θέσεων εγκατάστασης αιολικών πάρκων, δίνοντας έμφαση στον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων. Η μελέτη τους καταδεικνύει ότι οι διαφοροποιήσεις στη στάθμιση των κριτηρίων επηρεάζουν σημαντικά την τελική κατάταξη των εναλλακτικών περιοχών, γεγονός που υπογραμμίζει τον ρόλο της υποκειμενικότητας στη διαδικασία αξιολόγησης.

Παράλληλα, οι Döker et al. (2025) εφαρμόζουν fuzzy πολυκριτηριακή ανάλυση για τη χωροθέτηση αιολικών πάρκων, η οποία αποτελεί επέκταση των κλασικών μεθόδων και επιτρέπει την αξιολόγηση κριτηρίων με αβεβαιότητα μέσω βαθμών καταλληλότητας αντί για αυστηρές τιμές, επισημαίνοντας ότι η ενσωμάτωση ασαφών δεδομένων οδηγεί σε πιο ρεαλιστική αποτύπωση των συνθηκών. Αντίστοιχα, οι Placide & Lollchund (2024) αξιοποιούν συνδυασμό GIS και fuzzy λογικής, επιβεβαιώνοντας ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα παρουσιάζουν αβεβαιότητα ή μεταβλητότητα.

Επιπλέον, η εργασία των Manolan Kandy et al. (2024) προτείνει ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο χωροθέτησης που ενσωματώνει τη διάσταση των συγκρούσεων μεταξύ

διαφορετικών χρήσεων γης. Η εφαρμογή του μοντέλου καταδεικνύει ότι η συνεκτίμηση κοινωνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, πέραν των τεχνικών, συμβάλλει στη διαμόρφωση πιο βιώσιμων λύσεων χωροθέτησης.

Παράλληλα, οι Badi et al. (2023) παρουσιάζουν εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης για την επιλογή θέσεων εγκατάστασης αιολικών πάρκων, επισημαίνοντας ότι η μεθοδολογία μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά δεδομένα και συνθήκες. Η μελέτη αυτή αναδεικνύει την ευελιξία των πολυκριτηριακών μεθόδων και τη δυνατότητά τους να εφαρμοστούν σε διαφορετικά γεωγραφικά και θεσμικά πλαίσια.

Τέλος, οι Karamountzou & Vagiona (2023), σε εφαρμογή στον ελληνικό χώρο, εξετάζουν την καταλληλότητα υφιστάμενων αιολικών πάρκων, αναδεικνύοντας τη σημασία της πολυκριτηριακής αξιολόγησης τόσο για τη χωροθέτηση νέων εγκαταστάσεων όσο και για την αποτίμηση ήδη λειτουργούντων έργων. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους επιβεβαιώνουν ότι η αξιολόγηση της καταλληλότητας επηρεάζεται από συνδυασμό τεχνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Συνολικά, οι παραπάνω εφαρμογές καταδεικνύουν ότι η πολυκριτηριακή ανάλυση αποτελεί ένα ευέλικτο και αξιόπιστο εργαλείο για τη χωροθέτηση αιολικών πάρκων, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά δεδομένα και συνθήκες. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στις εφαρμοζόμενες μεθοδολογίες επιβεβαιώνουν ότι η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και τους στόχους της ανάλυσης. Στο πλαίσιο αυτό, η μέθοδος PROMETHEE, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αναλύεται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

4.4 Περιγραφή της μεθόδου PROMETHEE

Η μέθοδος PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης τύπου υπεροχής (outranking methods), η οποία χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση και κατάταξη εναλλακτικών λύσεων σε προβλήματα λήψης αποφάσεων με

πολλαπλά κριτήρια. Η μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση των εναλλακτικών ανά ζεύγη και στον προσδιορισμό του βαθμού προτίμησης της μίας εναλλακτικής λύσης έναντι της άλλης για κάθε κριτήριο (Josimović et al., 2023).

Στο πλαίσιο της PROMETHEE, κάθε εναλλακτική λύση αξιολογείται ως προς ένα σύνολο κριτηρίων, στα οποία αντιστοιχούν συγκεκριμένα βάρη που εκφράζουν τη σχετική τους σημασία. Η σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών πραγματοποιείται μέσω συναρτήσεων προτίμησης, οι οποίες μετατρέπουν τις διαφορές στις τιμές των κριτηρίων σε βαθμούς προτίμησης, λαμβάνοντας τιμές μεταξύ 0 και 1. Με τον τρόπο αυτό, αποτυπώνεται ο βαθμός στον οποίο μία εναλλακτική υπερέχει έναντι μιας άλλης.

Για κάθε ζεύγος εναλλακτικών υπολογίζεται ο συνολικός δείκτης προτίμησης, ο οποίος προκύπτει από το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους προτιμήσεων για όλα τα κριτήρια.

Στη συνέχεια, για κάθε εναλλακτική υπολογίζονται δύο βασικά μεγέθη:

- η **θετική ροή υπεροχής (Φ^+)**, η οποία εκφράζει τον βαθμό στον οποίο μία εναλλακτική υπερέχει έναντι των υπολοίπων,
- η **αρνητική ροή υπεροχής (Φ^-)**, η οποία εκφράζει τον βαθμό στον οποίο μία εναλλακτική υστερεί έναντι των υπολοίπων.

Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών οδηγεί στον υπολογισμό της **καθαρής ροής υπεροχής (Φ)**, η οποία χρησιμοποιείται για την τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων:

$$\Phi = \Phi^+ - \Phi^-$$

Η μέθοδος PROMETHEE περιλαμβάνει δύο βασικές εκδοχές:

- **PROMETHEE I**, η οποία παρέχει μερική κατάταξη των εναλλακτικών, επιτρέποντας την ύπαρξη ασυγκρίσιμων περιπτώσεων,
- **PROMETHEE II**, η οποία οδηγεί σε πλήρη κατάταξη, βασιζόμενη στην καθαρή ροή υπεροχής.

Η PROMETHEE I είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατανόηση των σχέσεων υπεροχής μεταξύ των εναλλακτικών, ενώ η PROMETHEE II επιτρέπει την εξαγωγή μιας σαφούς

τελικής κατάταξης, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές χωροθέτησης. Σημαντικό στοιχείο της μεθόδου αποτελεί η επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων προτίμησης για κάθε κριτήριο, καθώς αυτές επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο αποτιμώνται οι διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών. Η επιλογή αυτή βασίζεται στη φύση του κάθε κριτηρίου και στα χαρακτηριστικά του προβλήματος (Josimović et al., 2023).

Η μέθοδος PROMETHEE παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα ενσωμάτωσης τόσο ποσοτικών όσο και ποιοτικών δεδομένων, η ευελιξία στη διαχείριση διαφορετικών τύπων κριτηρίων και η σαφής ερμηνεία των αποτελεσμάτων μέσω των ροών υπεροχής. Για τους λόγους αυτούς, έχει εφαρμοστεί εκτενώς στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων, όπου απαιτείται η σύγκριση πολλαπλών εναλλακτικών θέσεων με βάση σύνθετα κριτήρια (Bertsiou et al., 2025; Josimović et al., 2023).

Η θεωρητική προσέγγιση της μεθόδου PROMETHEE, όπως παρουσιάστηκε, παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την αξιολόγηση και κατάταξη εναλλακτικών λύσεων σε προβλήματα πολυκριτηριακής ανάλυσης. Ωστόσο, για την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου και τον υπολογισμό των ροών υπεροχής απαιτείται η χρήση κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων, τα οποία διευκολύνουν τη διαχείριση των δεδομένων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στο πλαίσιο αυτό, το λογισμικό Visual PROMETHEE αποτελεί ένα εξειδικευμένο εργαλείο που επιτρέπει την υλοποίηση της μεθόδου σε πραγματικές συνθήκες, παρέχοντας παράλληλα δυνατότητες οπτικοποίησης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες του λογισμικού, καθώς και ο τρόπος αξιοποίησής του στην παρούσα εργασία.

4.5 Το λογισμικό Visual PROMETHEE

Το Visual PROMETHEE αποτελεί εξειδικευμένο λογισμικό υποστήριξης λήψης αποφάσεων, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο PROMETHEE και χρησιμοποιείται για την εφαρμογή πολυκριτηριακών αναλύσεων σε προβλήματα που περιλαμβάνουν πολλαπλές εναλλακτικές λύσεις και αντικρουόμενα κριτήρια αξιολόγησης.

Το λογισμικό παρέχει ένα ολοκληρωμένο και διαδραστικό περιβάλλον, μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να οργανώσει τα δεδομένα της ανάλυσης, να εφαρμόσει τη μεθοδολογία και να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα με συστηματικό τρόπο.

Η λειτουργία του Visual PROMETHEE βασίζεται στην εισαγωγή ενός πίνακα αξιολόγησης, στον οποίο καταγράφονται οι εναλλακτικές λύσεις και οι αντίστοιχες τιμές τους ως προς κάθε κριτήριο. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι εναλλακτικές αντιστοιχούν σε υποψήφιες θέσεις εγκατάστασης αιολικών πάρκων, ενώ τα κριτήρια σχετίζονται με τεχνικές, περιβαλλοντικές και χωρικές παραμέτρους. Στη συνέχεια, ο χρήστης ορίζει τον τύπο κάθε κριτηρίου, καθορίζει τα βάρη και επιλέγει τις κατάλληλες συναρτήσεις προτίμησης, οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο αξιολόγησης των διαφορών μεταξύ των εναλλακτικών.

Με βάση τα δεδομένα αυτά, το λογισμικό υπολογίζει τους δείκτες προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών και στη συνέχεια τις ροές υπεροχής, δηλαδή τη θετική ροή (Φ^+), την αρνητική ροή (Φ^-) και την καθαρή ροή (Φ), η οποία χρησιμοποιείται για την τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του Visual PROMETHEE είναι η δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων μέσω εξειδικευμένων εργαλείων, τα οποία διευκολύνουν την κατανόηση της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, το λογισμικό παρέχει:

- **PROMETHEE Rankings**, μέσω των οποίων παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μερικής (PROMETHEE I) και της πλήρους κατάταξης (PROMETHEE II) των εναλλακτικών λύσεων.
- **PROMETHEE Diamond**, το οποίο απεικονίζει γραφικά τις εναλλακτικές με βάση τις θετικές και αρνητικές ροές υπεροχής, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση της απόδοσής τους.
- **GAIA Plane (Geometrical Analysis for Interactive Aid)**, που παρέχει δισδιάστατη απεικόνιση των εναλλακτικών και των κριτηρίων, επιτρέποντας την ανάλυση των σχέσεων μεταξύ τους και τον εντοπισμό συγκρούσεων ή συσχετίσεων.

- **Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)**, η οποία επιτρέπει τη μεταβολή των βαρών των κριτηρίων και την αξιολόγηση της επίδρασης των αλλαγών στην τελική κατάταξη των εναλλακτικών.

Τα παραπάνω εργαλεία συμβάλλουν ουσιαστικά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των εναλλακτικών λύσεων και της επίδρασης των κριτηρίων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Στην παρούσα εργασία, το Visual PROMETHEE χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της πολυκριτηριακής ανάλυσης και την αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης αιολικών πάρκων. Μέσω του λογισμικού πραγματοποιείται η εισαγωγή των δεδομένων, ο καθορισμός των παραμέτρων της ανάλυσης και ο υπολογισμός των ροών υπεροχής, ενώ παράλληλα αξιοποιούνται τα εργαλεία οπτικοποίησης για την παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται μία συστηματική και τεκμηριωμένη διαδικασία αξιολόγησης, η οποία υποστηρίζει αποτελεσματικά τη λήψη αποφάσεων.

5. Μεθοδολογικό Πλαίσιο της Έρευνας

5.1 Γενική Περιγραφή Μεθοδολογίας

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην αξιολόγηση της καταλληλότητας εναλλακτικών περιοχών για την εγκατάσταση αιολικού πάρκου, μέσω μιας συστηματικής και πολυπαραμετρικής προσέγγισης. Η μεθοδολογία που ακολουθείται βασίζεται σε πολυκριτηριακή προσέγγιση λήψης απόφασης (Multi-Criteria Decision Making – MCDM), με υποστηρικτική αξιοποίηση γεωχωρικών δεδομένων, προκειμένου να καταστεί δυνατή η ταυτόχρονη συνεκτίμηση τεχνικών, μορφολογικών, περιβαλλοντικών και χωρικών παραμέτρων. Η διαδικασία υλοποιείται σε διαδοχικά στάδια.

Σε πρώτο επίπεδο πραγματοποιείται η ανασκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας με στόχο τον προσδιορισμό των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται συστηματικά στη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων. Με βάση τα ευρήματα της βιβλιογραφικής διερεύνησης, διαμορφώνεται το σύνολο των κριτηρίων που υιοθετούνται στην παρούσα μελέτη και τα οποία ανταποκρίνονται τόσο στις διεθνείς πρακτικές όσο και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής εφαρμογής.

Στη συνέχεια, συλλέγονται και επεξεργάζονται τα απαραίτητα γεωχωρικά δεδομένα για κάθε κριτήριο. Τα δεδομένα προέρχονται από θεσμικές βάσεις, χαρτογραφικά υπόβαθρα και εξειδικευμένα γεωχωρικά σύνολα δεδομένων, και ενσωματώνονται σε περιβάλλον GIS. Μέσω χωρικών αναλύσεων (υπολογισμός αποστάσεων, εξαγωγή μορφολογικών παραμέτρων, επικάλυψη θεματικών επιπέδων), αποδίδονται ποσοτικές τιμές στα κριτήρια για κάθε εξεταζόμενη περιοχή.

Η συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών περιοχών πραγματοποιείται με τη μέθοδο PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), η οποία αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες πολυκριτηριακές μεθόδους κατάταξης. Η μέθοδος επιτρέπει τη συνεκτίμηση ετερογενών κριτηρίων, την ενσωμάτωση βαρών σημαντικότητας και την παραγωγή καθαρής κατάταξης των

εναλλακτικών λύσεων, μέσω της ανάλυσης θετικών και αρνητικών ροών προτίμησης. Η επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου κρίνεται κατάλληλη για το αντικείμενο της μελέτης, καθώς παράγει συγκρίσιμα αποτελέσματα και σαφή ιεράρχηση των εναλλακτικών περιοχών.

Συνολικά, η μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας οργανώνεται γύρω από τρεις βασικούς πυλώνες: (α) την τεκμηριωμένη επιλογή των κριτηρίων αξιολόγησης βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας, (β) την ποσοτικοποίηση και χωρική αποτύπωσή τους και (γ) την πολυκριτηριακή κατάταξη των εναλλακτικών περιοχών με τη μέθοδο PROMETHEE. Η διαδοχική εφαρμογή των σταδίων αυτών επιτρέπει τη συστηματική και συγκρίσιμη αξιολόγηση των εξεταζόμενων θέσεων.

Διευκρινίζεται ότι οι εξεταζόμενες περιοχές αντιστοιχούν σε υφιστάμενες θέσεις αιολικών εγκαταστάσεων στην Κρήτη. Ωστόσο, η παρούσα ανάλυση δεν αποσκοπεί στην αποτίμηση της λειτουργίας των υφιστάμενων έργων, αλλά στην υποθετική αξιολόγηση των συγκεκριμένων θέσεων ως εναλλακτικών επενδυτικών επιλογών. Στο πλαίσιο αυτό, οι περιοχές αντιμετωπίζονται ως δυνητικές τοποθεσίες χωροθέτησης και εξετάζεται ποια από αυτές θα επιλεγόταν εάν η απόφαση εγκατάστασης λαμβανόταν εκ νέου, βάσει των καθορισμένων κριτηρίων και της εφαρμοζόμενης πολυκριτηριακής μεθόδου.

5.2 Περιγραφή περιοχών μελέτης

Η παρούσα μελέτη εξετάζει τρεις εναλλακτικές περιοχές εγκατάστασης αιολικού πάρκου στην Κρήτη, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς το γεωμορφολογικό τους υπόβαθρο και το υψομετρικό εύρος. Η επιλογή περιοχών με διαφορετική μορφολογία αποσκοπεί στη διερεύνηση της επίδρασης του αναγλύφου στην καταλληλότητα χωροθέτησης, καθώς τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τόσο το αιολικό δυναμικό όσο και τις τεχνικές απαιτήσεις υλοποίησης ενός έργου. Οι τρεις περιοχές ταξινομούνται σε ορεινή, ημιορεινή και παραθαλάσσια/παράκτια, προκειμένου να

εκπροσωπούν διαφορετικού τύπου χωρικά περιβάλλοντα και να επιτρέπουν συγκριτική αξιολόγηση στο πλαίσιο της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

5.2.1 Ορεινό Περιβάλλον: Βοσκερό

Η περιοχή Βοσκερό εντοπίζεται στον Δήμο Μαλεβιζίου, της Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου και χαρακτηρίζεται από έντονο ορεινό ανάγλυφο και σημαντικές υψομετρικές διακυμάνσεις. Το υψόμετρο της περιοχής είναι αυξημένο σε σχέση με τις λοιπές εξεταζόμενες θέσεις, ενώ η μορφολογία του εδάφους παρουσιάζει σε αρκετά σημεία σημαντικές κλίσεις. Η γεωγραφική θέση της περιοχής, σε σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87, προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες $X = 587666,28$ m και $Y = 3901318,86$ m.

Το ορεινό περιβάλλον ευνοεί συχνά την εμφάνιση αυξημένων ταχυτήτων ανέμου λόγω της έκθεσης και της τοπογραφικής επιτάχυνσης της ροής, γεγονός που μπορεί να ενισχύσει το ενεργειακό δυναμικό της περιοχής. Παράλληλα, οι αυξημένες κλίσεις ενδέχεται να επηρεάσουν τις τεχνικές απαιτήσεις κατασκευής, ιδίως ως προς τη θεμελίωση και τη διαμόρφωση οδικής πρόσβασης. Σε ορεινές ζώνες είναι επίσης πιθανή η παρουσία δασικών εκτάσεων ή προστατευόμενων περιοχών, στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη στα περιβαλλοντικά κριτήρια της ανάλυσης.

5.2.2 Ημιορεινό Περιβάλλον: Επανωσήφης

Η περιοχή Επανωσήφης βρίσκεται στον Δήμο Αρχανών–Αστερουσίων, της Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου και εντάσσεται σε ημιορεινή γεωμορφολογική ενότητα, με ηπιότερες υψομετρικές μεταβολές σε σύγκριση με την ορεινή θέση Βοσκερό. Το ανάγλυφο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί πλήρως ομαλό, καθώς παρουσιάζει αισθητή διαφοροποίηση, η οποία επηρεάζει τις τεχνικές παραμέτρους εγκατάστασης. Παρότι η μορφολογία είναι λιγότερο έντονη σε σχέση με την ορεινή περιοχή, εξακολουθεί να είναι απαραίτητος ο προσεκτικός τεχνικός σχεδιασμός ως προς

τη θεμελίωση των ανεμογεννητριών και τη διαμόρφωση της οδικής πρόσβασης. Η γεωγραφική θέση της περιοχής, σε σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87, προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες $X = 602838,18$ m και $Y = 3889957,11$ m.

Ωστόσο, σε ημιορεινές περιοχές το αιολικό δυναμικό ενδέχεται να διαφοροποιείται σε σχέση με τις ορεινές, καθώς η ροή του ανέμου επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο από τη μορφολογία του εδάφους. Επιπλέον, οι περιοχές με ηπιότερο ανάγλυφο συνδέονται συχνά με γεωργικές δραστηριότητες και μεγαλύτερη εγγύτητα σε οικισμούς, παράγοντες που επηρεάζουν τόσο τα χωρικά όσο και τα κοινωνικά κριτήρια της αξιολόγησης.

5.2.3 Παραθαλάσσιο Περιβάλλον: Ακρωτήριο Αγίου Ιωάννη Βρουχά

Η περιοχή Ακρωτήρι Αγίου Ιωάννη Βρουχά εντοπίζεται στον Δήμο Αγίου Νικολάου, της Περιφερειακής Ενότητας Λασιθίου και χαρακτηρίζεται από παραθαλάσσιο ανάγλυφο, καθώς αναπτύσσεται σε μικρή απόσταση από τη θαλάσσια ζώνη. Οι παράκτιες περιοχές συχνά εμφανίζουν αυξημένο και πιο σταθερό αιολικό δυναμικό, λόγω της θερμικής διαφοροποίησης ξηράς-θάλασσας και της ανεμπόδιστης ροής των αερίων μαζών. Η γεωγραφική θέση της περιοχής, σε σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87, προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες $X = 659245,12$ m και $Y = 3910623,47$ m.

Το ανάγλυφο της περιοχής παρουσιάζει μεταβατικά χαρακτηριστικά μεταξύ χαμηλών υψομέτρων και τοπικών ανυψώσεων, επιτρέποντας τη διερεύνηση τόσο των τοπογραφικών όσο και των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Παράλληλα, η παράκτια ζώνη ενδέχεται να σχετίζεται με τουριστικές δραστηριότητες ή προστατευόμενες περιοχές, στοιχεία που ενσωματώνονται στην πολυκριτηριακή ανάλυση.

5.3 Προσδιορισμός Κριτηρίων Αξιολόγησης

5.3.1 Εισαγωγή στα κριτήρια αξιολόγησης

Η επιλογή των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία προέκυψε από συστηματική ανασκόπηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με τη χωροθέτηση αιολικών πάρκων, σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων γεωχωρικών δεδομένων για την περιοχή μελέτης. Η ανάλυση των σύγχρονων ερευνητικών προσεγγίσεων ανέδειξε ένα σύνολο παραμέτρων που επανεμφανίζονται με συνέπεια σε μελέτες πολυκριτηριακής αξιολόγησης και θεωρούνται καθοριστικές για την εκτίμηση της καταλληλότητας μιας περιοχής.

Η βιβλιογραφική τεκμηρίωση υποδεικνύει ότι η χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, αλλά προϋποθέτει τη συνδυαστική αξιολόγηση τεχνικών, τοπογραφικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Παράγοντες όπως η προσβασιμότητα, η εγγύτητα σε ενεργειακές υποδομές, οι χωρικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί, καθώς και τα χαρακτηριστικά του φυσικού αναγλύφου, επηρεάζουν ουσιαστικά τόσο τη βιωσιμότητα όσο και το κόστος υλοποίησης ενός αιολικού έργου. Στο πλαίσιο αυτό, διαμορφώθηκε ένα σύνολο δέκα (10) κριτηρίων, τα οποία κρίθηκαν κατάλληλα για την εφαρμογή τους στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης και ενσωματώνονται στην πολυκριτηριακή ανάλυση:

- Αιολικό δυναμικό
- Απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης
- Απόσταση από οδικό δίκτυο (ασφαλτοστρωμένο)
- Απόσταση από πλησιέστερο οικισμό
- Μέση κλίση εδάφους
- Ύψόμετρο
- Απόσταση από περιοχές τουριστικής δραστηριότητας
- Απόσταση από οριοθετημένους αρχαιολογικούς χώρους
- Δασικές εκτάσεις
- Απόσταση από περιοχές του δικτύου Natura 2000

Τα παραπάνω κριτήρια επιτρέπουν την ολοκληρωμένη αποτύπωση της ενεργειακής απόδοσης, των μορφολογικών και χωρικών χαρακτηριστικών, της προσβασιμότητας και των περιβαλλοντικών παραμέτρων κάθε εξεταζόμενης περιοχής. Η ενσωμάτωσή τους σε περιβάλλον GIS καθιστά δυνατή την ποσοτική σύγκριση των εναλλακτικών θέσεων βάσει αντικειμενικών και μετρήσιμων γεωχωρικών δεδομένων. Στις επόμενες υποενότητες ακολουθεί ο αναλυτικός προσδιορισμός των επιλεγμένων κριτηρίων και η παράθεση των τιμών που προέκυψαν από την επεξεργασία για καθεμία από τις εξεταζόμενες περιοχές.

5.3.2 Αναλυτική παρουσίαση των κριτηρίων αξιολόγησης

5.3.2.1 Αιολικό Δυναμικό (Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου $h100$)

Το αιολικό δυναμικό αποτελεί το θεμελιώδες τεχνικό κριτήριο για τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, καθώς επηρεάζει άμεσα την παραγόμενη ενέργεια και, κατ' επέκταση, τη βιωσιμότητα και οικονομική αποδοτικότητα του έργου. Η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου χρησιμοποιείται εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία ως βασική παράμετρος αξιολόγησης της καταλληλότητας μιας περιοχής για εγκατάσταση αιολικών πάρκων.

Η κεντρική σημασία του κριτηρίου επιβεβαιώνεται σε πλήθος μελετών πολυκριτηριακής χωρικής ανάλυσης, όπως στις εργασίες των Moradi et al. (2020), Albraheem & AlAwlaqi (2023), Asadi & Pourhossein (2021), Manolan Kandy et al. (2024), Döker et al. (2025), Placide & Lollchund (2024) και Josimović et al. (2023), όπου η ταχύτητα ανέμου ή εναλλακτικά η πυκνότητα ισχύος ανέμου εντάσσονται στα βασικά τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης. Στις εν λόγω μελέτες, το αιολικό δυναμικό εμφανίζεται με υψηλή βαρύτητα, γεγονός που αναδεικνύει τον καθοριστικό του ρόλο στη διαδικασία χωροθέτησης.

Στην παρούσα μελέτη, το αιολικό δυναμικό προσδιορίστηκε μέσω της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου σε ύψος 100 m ($h100$), ύψος που αντιστοιχεί σε τυπικό επίπεδο πλήμνης σύγχρονων ανεμογεννητριών. Το κριτήριο εντάσσεται στην κατηγορία των κριτηρίων ωφέλειας (benefit criterion), καθώς υψηλότερες τιμές συνεπάγονται αυξημένη καταλληλότητα.

Τα δεδομένα αντλήθηκαν από την πλατφόρμα **Global Wind Atlas**, η οποία βασίζεται σε αριθμητικά μοντέλα ατμοσφαιρικής ροής και μακροχρόνια κλιματικά δεδομένα. Για κάθε εξεταζόμενη περιοχή πραγματοποιήθηκε σημειακή εξαγωγή τιμής (point extraction) σε ύψος 100 m, με στόχο τη διασφάλιση της συγκρισιμότητας μεταξύ των εναλλακτικών θέσεων.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου σε ύψος 100 m (h100), όπως προέκυψαν για καθεμία από τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις. Οι τιμές εκφράζονται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s) και χρησιμοποιούνται ως πρωτογενή δεδομένα στην πολυκριτηριακή ανάλυση.

Θέση	$\bar{V}(\text{m/s})$
Βοσκερό	11,23
Επανωσήφης	10,47
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	12,46

Πίνακας 1: Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου (h100) ανά θέση

5.3.2.2 Απόσταση από Δίκτυο Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η απόσταση από τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί καθοριστικό οικονομικο-τεχνικό κριτήριο στη διαδικασία χωροθέτησης αιολικών πάρκων, καθώς επηρεάζει άμεσα το κόστος διασύνδεσης, τις ενεργειακές απώλειες και τη συνολική βιωσιμότητα του έργου. Η εγγύτητα σε υφιστάμενες γραμμές υψηλής τάσης μειώνει την ανάγκη κατασκευής νέων υποδομών και περιορίζει το απαιτούμενο επενδυτικό κόστος.

Η σημασία του κριτηρίου επιβεβαιώνεται συστηματικά στη διεθνή βιβλιογραφία πολυκριτηριακής αξιολόγησης χωροθέτησης αιολικών πάρκων. Συγκεκριμένα, η απόσταση από γραμμές μεταφοράς ενσωματώνεται ως βασικό κριτήριο στις μελέτες των Döker et al. (2025), Asadi & Pourhossein (2021), Placide & Lollchund (2024), Josimović et al. (2023), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020), όπου

αναγνωρίζεται ως παράγοντας υψηλής βαρύτητας στη διαδικασία αξιολόγησης καταλληλότητας.

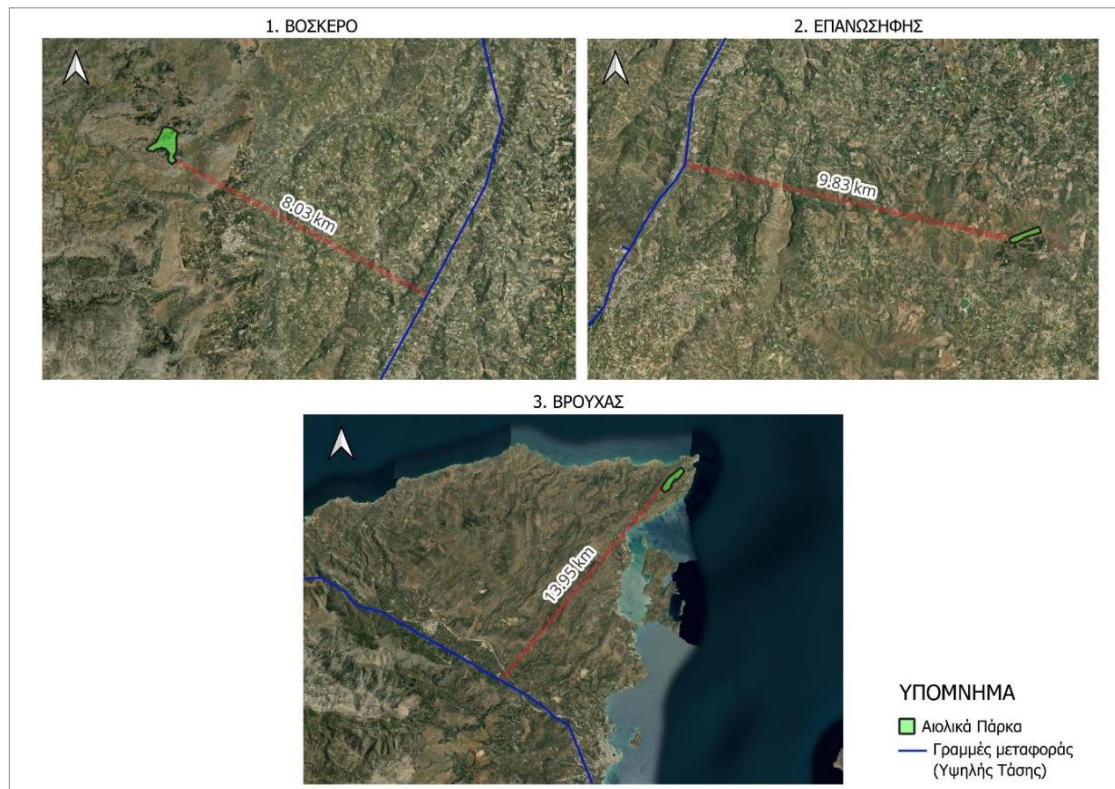
Οι παραπάνω μελέτες συγκλίνουν στο ότι η διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τεχνικοοικονομικούς παράγοντες, συχνά δεύτερο σε βαρύτητα μετά το αιολικό δυναμικό. Η ένταξη του κριτηρίου στην παρούσα μελέτη εναρμονίζεται με τη διεθνή πρακτική και διασφαλίζει τη συνεκτικότητα της παραμέτρου κόστους στη διαδικασία αξιολόγησης.

Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης, το κριτήριο ορίστηκε ως η ελάχιστη οριζόντια απόσταση (m) κάθε εξεταζόμενης περιοχής από τις πλησιέστερες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον QGIS. Η καταλληλότητα της περιοχής μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς, λόγω της αντίστοιχης αύξησης του κόστους διασύνδεσης.

Οι τιμές που προέκυψαν για τις τρεις περιοχές μελέτης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2, ενώ η χωρική σχέση μεταξύ των υποψήφιων περιοχών και του δικτύου μεταφοράς απεικονίζεται στην Εικόνα 3, στην οποία παρουσιάζονται οι αντίστοιχες αποστάσεις και η γεωγραφική τους διάταξη.

Περιοχή	ΔΗΤΛ (m)
Βοσκερό	8028
Επανωσήφης	9825
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	13948

Πίνακας 2: Απόσταση από δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανά θέση



Εικόνα 3: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από το δίκτυο υψηλής τάσης

5.3.2.3 Απόσταση από Οδικό Δίκτυο (ασφαλτοστρωμένο)

Η απόσταση από το υφιστάμενο οδικό δίκτυο αποτελεί βασικό τεχνικοοικονομικό κριτήριο στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων, καθώς συνδέεται με την προσβασιμότητα της θέσης, το κόστος μεταφοράς εξοπλισμού και τη δυνατότητα κατασκευής και συντήρησης των εγκαταστάσεων. Η ύπαρξη προσβάσιμων οδικών υποδομών περιορίζει την ανάγκη δημιουργίας νέων δρόμων και συνεπώς μειώνει το συνολικό κόστος υλοποίησης.

Η σημασία του κριτηρίου επιβεβαιώνεται στη διεθνή βιβλιογραφία, όπου η απόσταση από το οδικό δίκτυο ή η προσβασιμότητα περιλαμβάνεται συστηματικά στα πλαίσια πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, το κριτήριο αυτό απαντάται στις μελέτες των Döker et al. (2025), Asadi & Pourhossein (2021), Placide & Lollchund (2024), Josimović et al. (2023), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020), ενώ

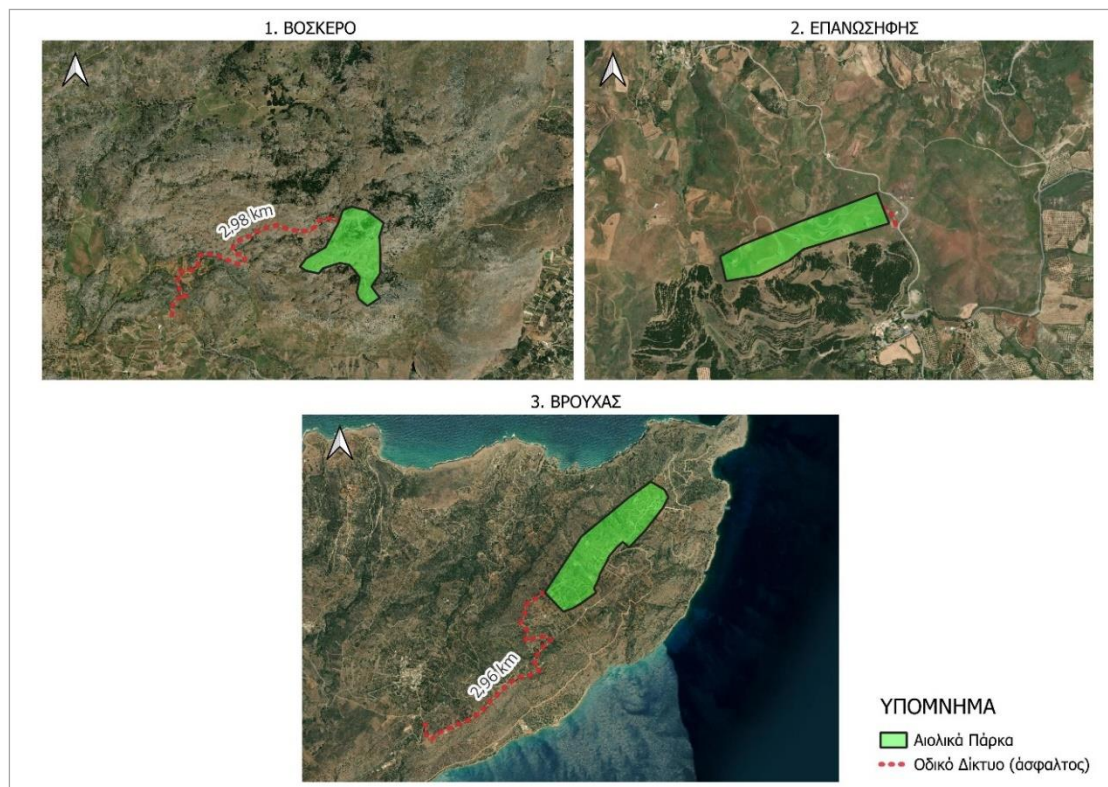
στην εργασία των Manolan Kandy et al. (2024) εξετάζεται υπό τον όρο «προσβασιμότητα».

Στις ανωτέρω μελέτες το κριτήριο λαμβάνει διαφορετικά βάρη, γεγονός που υποδηλώνει τη σχετική του σημασία στο εκάστοτε μεθοδολογικό πλαίσιο. Το κριτήριο αξιολογείται με τρόπο ώστε μικρότερες αποστάσεις να συνεπάγονται αυξημένη καταλληλότητα, δεδομένου ότι η εγγύτητα στο οδικό δίκτυο διευκολύνει την υλοποίηση και λειτουργία του έργου.

Στην παρούσα μελέτη, το κριτήριο προσδιορίστηκε ως η ελάχιστη οριζόντια απόσταση κάθε υπονήφιας θέσης από το πλησιέστερο τμήμα ασφαλτοστρωμένου οδικού δικτύου, όπως υπολογίστηκε σε περιβάλλον QGIS. Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3, ενώ η χωρική σχέση μεταξύ των θέσεων και του οδικού δικτύου απεικονίζεται στην Εικόνα 4.

Θέση	D_{road} (m)
Βοσκερό	2981
Επανωσήφης	157
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	2955

Πίνακας 3: Απόσταση από οδικό δίκτυο ανά θέση



Εικόνα 4: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από ασφαλτοστρωμένο οδικό δίκτυο

5.3.2.4 Απόσταση από Πλησιέστερο Οικισμό

Η απόσταση από τον πλησιέστερο οικισμό αποτελεί κρίσιμο κοινωνικο-χωρικό κριτήριο στη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, καθώς συνδέεται με ζητήματα κοινωνικής αποδοχής, οπτικής όχλησης και επιπτώσεων στο τοπικό περιβάλλον. Η εγγύτητα μιας αιολικής εγκατάστασης σε κατοικημένες περιοχές δύναται να επηρεάσει την ποιότητα ζωής των κατοίκων, γεγονός που καθιστά την παράμετρο αυτή ιδιαίτερα σημαντική στο πλαίσιο της αξιολόγησης καταλληλότητας.

Η σημασία του κριτηρίου επιβεβαιώνεται στη διεθνή βιβλιογραφία πολυκριτηριακής χωροθέτησης αιολικών πάρκων. Η απόσταση από οικισμούς ή αστικές περιοχές περιλαμβάνεται ως βασικό κριτήριο στις μελέτες των Manolan Kandy et al. (2024), Asadi & Pourhossein (2021), Josimović et al. (2023), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020), όπου αξιολογείται ως παράγοντας κοινωνικής και χωρικής καταλληλότητας. Στις εν λόγω μελέτες το κριτήριο λαμβάνει διαφορετικά βάρη, γεγονός που αντανakλά τη σημασία του στο εκάστοτε μεθοδολογικό πλαίσιο.

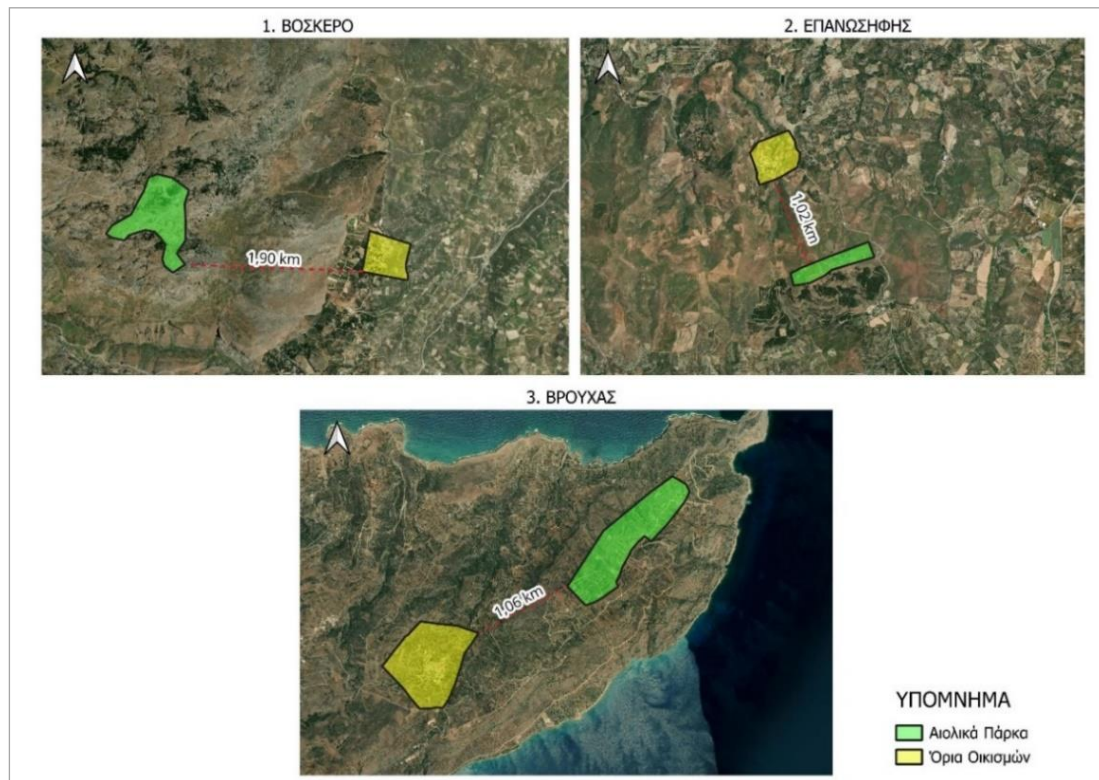
Το κριτήριο αξιολογείται με τέτοιο τρόπο ώστε μεγαλύτερες αποστάσεις να συνεπάγονται αυξημένη καταλληλότητα της θέσης, καθώς μειώνεται η πιθανότητα άμεσης αλληλεπίδρασης με τον οικισμό.

Στην παρούσα μελέτη, το κριτήριο προσδιορίστηκε ως η ελάχιστη οριζόντια απόσταση κάθε υποψήφιας θέσης από το πλησιέστερο θεσμοθετημένο όριο οικισμού, όπως αυτή υπολογίστηκε σε περιβάλλον QGIS με χρήση κατάλληλων εργαλείων χωρικής ανάλυσης. Μεγαλύτερες αποστάσεις συνεπάγονται αυξημένη καταλληλότητα της θέσης, καθώς περιορίζονται οι πιθανές επιπτώσεις στους κατοίκους και ενισχύεται η κοινωνική αποδοχή των εγκαταστάσεων.

Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4, ενώ η χωρική σχέση μεταξύ των υποψήφιων περιοχών και των οικισμών απεικονίζεται στην Εικόνα 5.

Θέση	D_{sett} (m)
Βοσκερό	1900
Επανωσήφης	1024
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	1063

Πίνακας 4: Απόσταση από πλησιέστερο οικισμό ανά θέση



Εικόνα 5: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από πλησιέστερο οικισμό

5.3.2.5 Μέση Κλίση Εδάφους

Η μέση κλίση του εδάφους αποτελεί σημαντικό τοπογραφικό κριτήριο στη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, καθώς επηρεάζει άμεσα τις τεχνικές απαιτήσεις κατασκευής, τη θεμελίωση των ανεμογεννητριών και τη διαμόρφωση της οδικής πρόσβασης. Η σημασία του τεκμηριώνεται εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία πολυκριτηριακής χωροθέτησης αιολικών πάρκων.

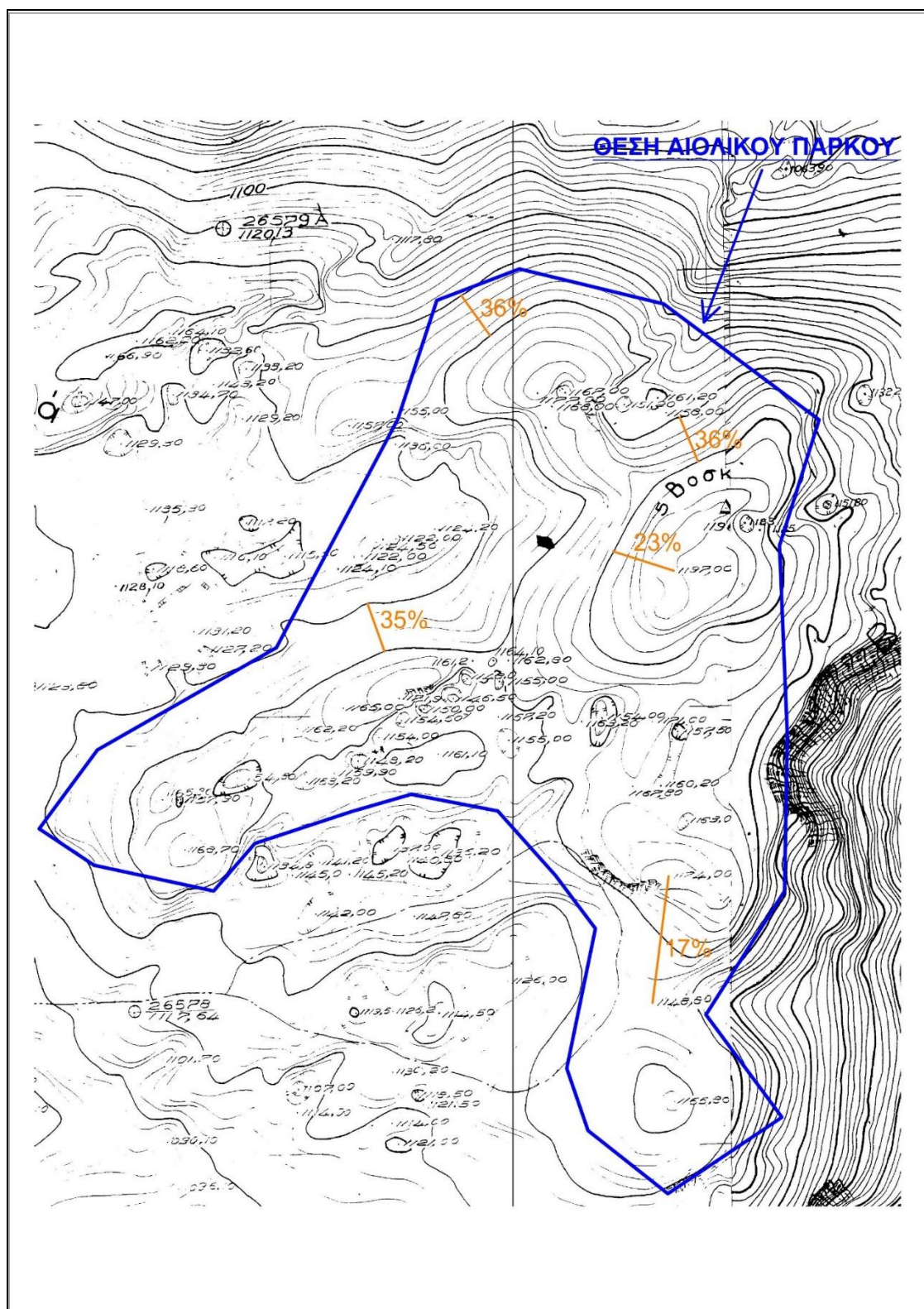
Η κλίση εδάφους περιλαμβάνεται ως βασική παράμετρος στις μελέτες των Döker et al. (2025), Asadi & Pourhossein (2021), Placide & Lollchund (2024), Josimović et al. (2023), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020). Στις περισσότερες από τις παραπάνω εργασίες αντιμετωπίζεται ως τεχνικό ή τοπογραφικό κριτήριο, το οποίο ενσωματώνεται στην πολυκριτηριακή ανάλυση με μεταβλητό βαθμό επίδρασης. Το κριτήριο αξιολογείται με τρόπο ώστε μικρότερες τιμές κλίσης να συνεπάγονται αυξημένη καταλληλότητα της θέσης.

Στην παρούσα μελέτη, η μέση κλίση του εδάφους προσδιορίστηκε βάσει τοπογραφικών χαρτών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) κλίμακας 1:5000, αξιοποιώντας τις ισοϋψείς καμπύλες που περιλαμβάνονται σε αυτούς. Μέσω ψηφιοποίησης και επεξεργασίας των υψομετρικών δεδομένων, υπολογίστηκε η μέση τιμή κλίσης (%) για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης.

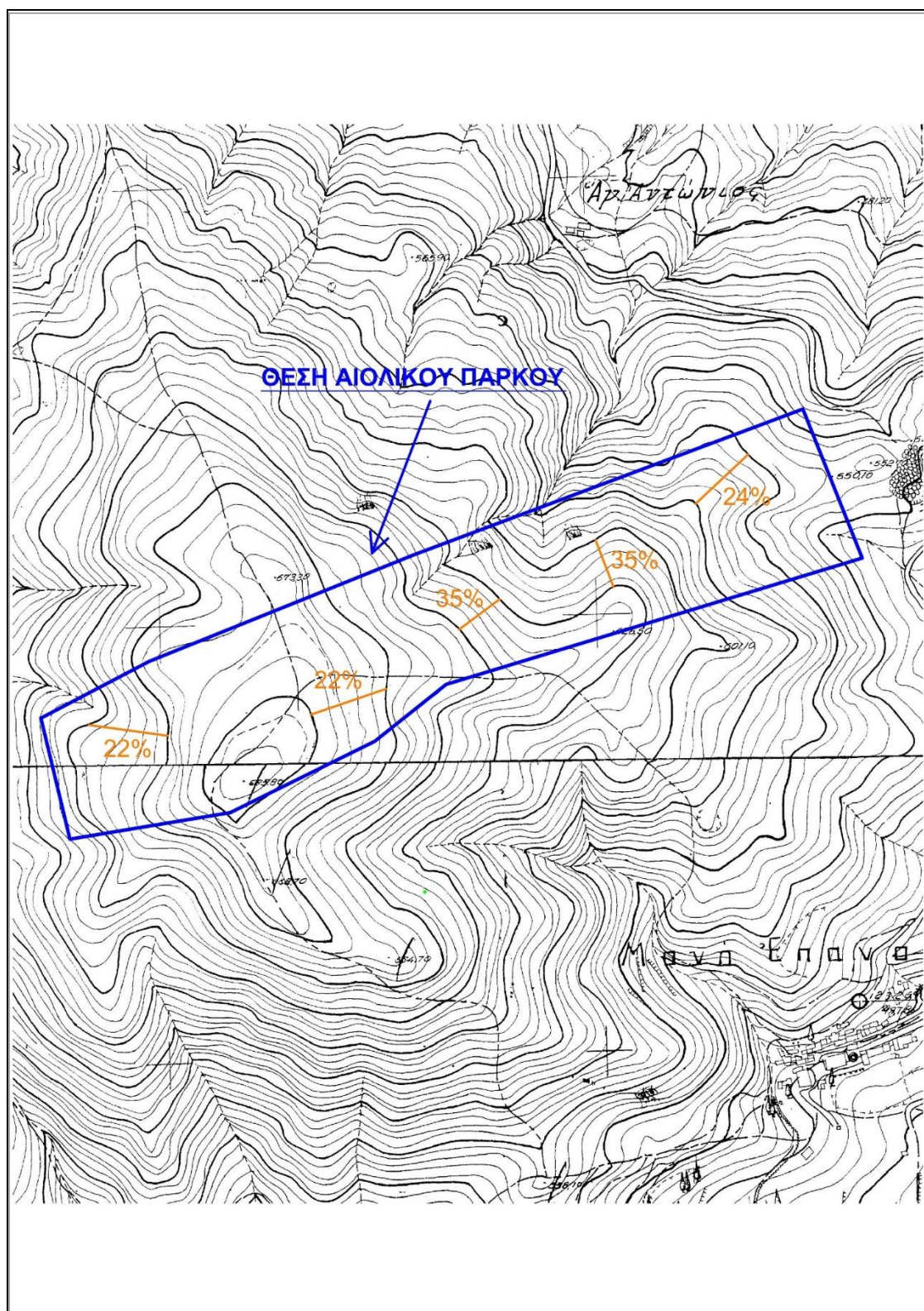
Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης κλίσης εδάφους για καθεμία από τις τρεις θέσεις, ενώ στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται η μορφολογική διαφοροποίηση των εξεταζόμενων περιοχών.

Θέση	S_{mean} (%)
Βοσκερό	29,4
Επανωσήφης	27,6
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	21,4

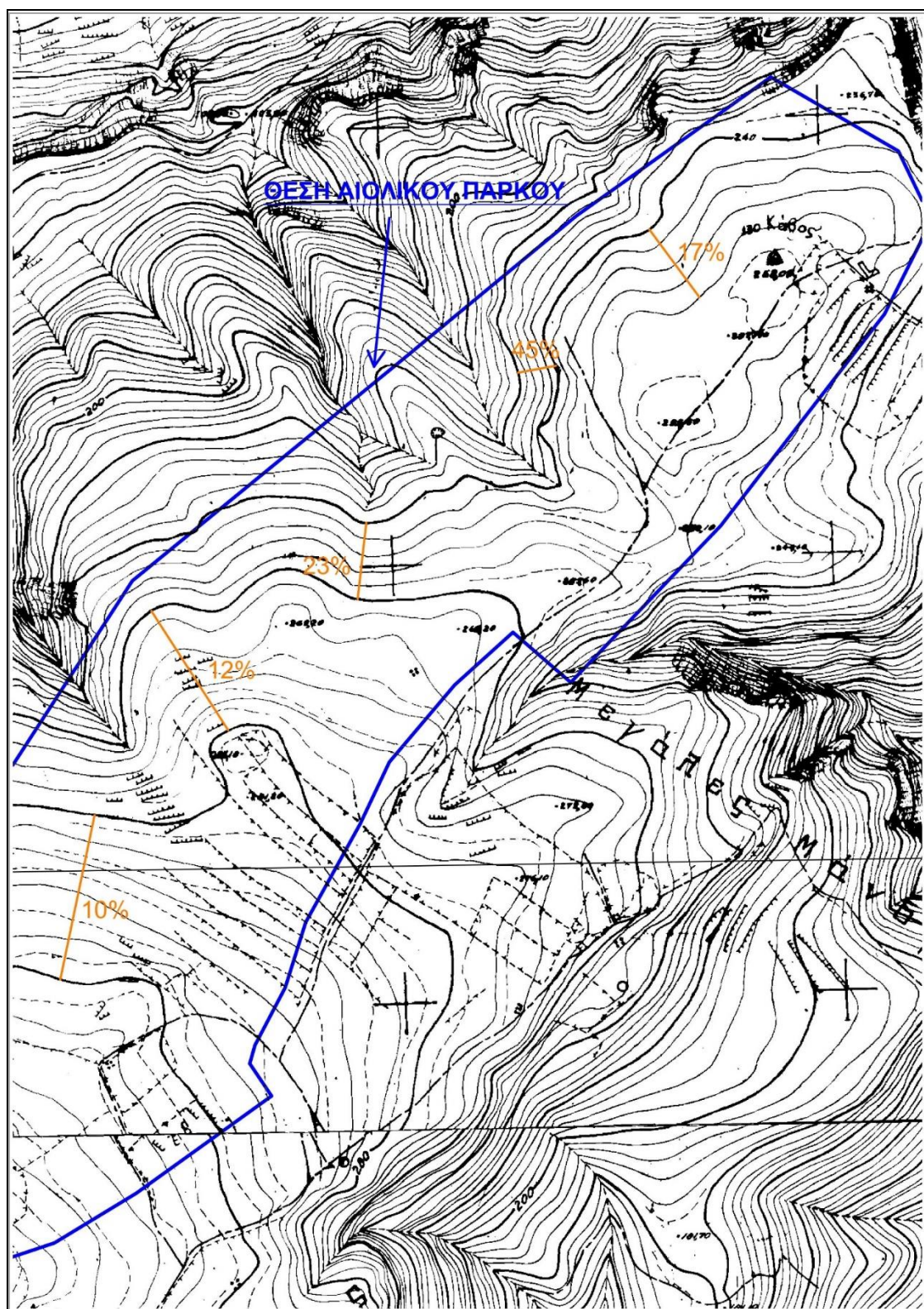
Πίνακας 5: Μέση κλίση εδάφους ανά θέση



Εικόνα 6: Θέση αιολικού πάρκου Βοσκερό – Χάρτης Γ.Υ.Σ. 95273-95274 – κλίμακα 1:5000



Εικόνα 7: Θέση αιολικού πάρκου Επανωσήφης – Χάρτης Γ.Υ.Σ. 95393-95395 – κλίμακα 1:5000



Εικόνα 8: Θέση αιολικού πάρκου Βρυχάς – Χάρτης Γ.Υ.Σ. 96155-96157 – κλίμακα 1:5000

5.3.2.6 Υψόμετρο Θέσης

Το υψόμετρο της θέσης αποτελεί μορφολογική παράμετρο που λαμβάνεται υπόψη στη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, καθώς σχετίζεται με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και, έμμεσα, με τις συνθήκες ροής του ανέμου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μεγαλύτερα υψόμετρα συνδέονται με αυξημένες ταχύτητες ανέμου, λόγω μειωμένων εμποδίων και ευνοϊκότερων τοπογραφικών συνθηκών.

Στη διεθνή βιβλιογραφία πολυκριτηριακής χωροθέτησης, το υψόμετρο περιλαμβάνεται ως μορφολογικό ή τοπογραφικό κριτήριο, συνήθως με χαμηλότερο βαθμό επίδρασης συγκριτικά με το αιολικό δυναμικό ή την εγγύτητα σε υποδομές. Στη μελέτη των Placide & Lollchund (2024), το υψόμετρο ενσωματώνεται ως τοπογραφικό κριτήριο με χαμηλή στάθμιση (0.04), γεγονός που υποδηλώνει ότι λειτουργεί συμπληρωματικά στο πλαίσιο της συνολικής αξιολόγησης και δεν αποτελεί πρωτεύουσα μεταβλητή σε σχέση με το αιολικό δυναμικό ή τις υποδομές.

Στην παρούσα μελέτη, οι τιμές υψομέτρου αντλήθηκαν από τα διαθέσιμα δεδομένα της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ). Για κάθε υποψήφια θέση προσδιορίστηκε το υψόμετρο (m), το οποίο ενσωματώθηκε στη βάση δεδομένων της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Το κριτήριο εξετάζεται συμπληρωματικά σε συνδυασμό με τη μέση κλίση εδάφους, ώστε να αποτυπώνεται πληρέστερα το μορφολογικό προφίλ κάθε θέσης. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι τιμές του υψομέτρου για καθεμία από τις τρεις θέσεις μελέτης.

Θέση	H (m)
Βοσκερό	1194
Επανωσήφης	680
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	324

Πίνακας 6: Απόλυτο υψόμετρο θέσης

5.3.2.7 Απόσταση από Περιοχές Τουριστικής Δραστηριότητας

Η απόσταση από περιοχές αναψυχής και τουριστικής δραστηριότητας αποτελεί κοινωνικο-χωρικό κριτήριο στη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων, καθώς συνδέεται με την οπτική ένταξη των έργων στο τοπίο και τη διατήρηση της τουριστικής φυσιογνωμίας μιας περιοχής. Σε περιοχές με αναπτυγμένη τουριστική δραστηριότητα, η εγγύτητα αιολικών εγκαταστάσεων ενδέχεται να επηρεάσει την αντιληπτή ποιότητα του τοπίου και την ελκυστικότητα του προορισμού.

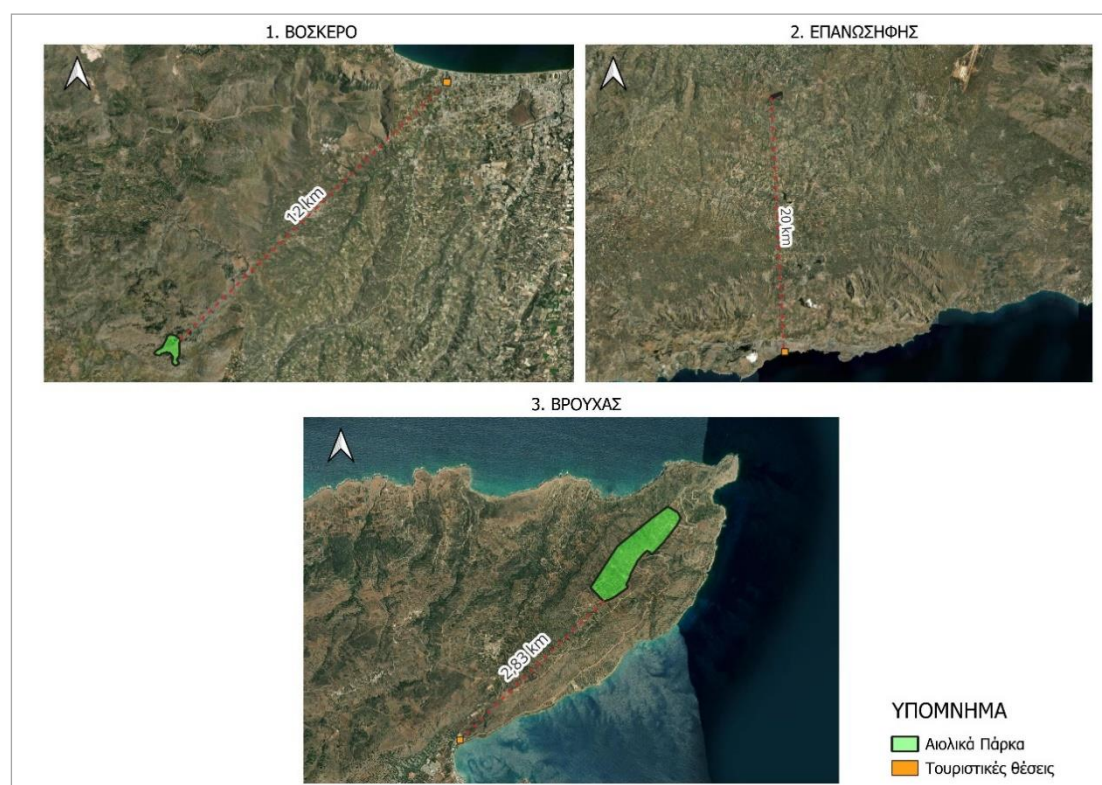
Η σημασία του κριτηρίου αποτυπώνεται στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), όπου οι τουριστικές περιοχές (Outdoor recreation) εντάσσονται στο πλαίσιο χωρικής πολυκριτηριακής ανάλυσης και λαμβάνουν στάθμιση 0,1. Η ενσωμάτωσή του καταδεικνύει τη σημασία που αποδίδεται στις περιοχές τουριστικής δραστηριότητας κατά την αξιολόγηση καταλληλότητας.

Το κριτήριο αξιολογείται με τρόπο ώστε μεγαλύτερες αποστάσεις να συνεπάγονται αυξημένη καταλληλότητα της θέσης, περιορίζοντας την πιθανότητα άμεσης χωρικής αλληλεπίδρασης με περιοχές τουριστικής δραστηριότητας. Στην παρούσα μελέτη, το κριτήριο προσδιορίστηκε ως η ελάχιστη οριζόντια απόσταση κάθε υποψήφιας θέσης από τις πλησιέστερες περιοχές τουριστικής δραστηριότητας, όπως αυτή υπολογίστηκε σε περιβάλλον QGIS.

Από την ανάλυση προέκυψε ότι η θέση «Ακρωτήρι Αγίου Ιωάννη Βρουχά» βρίσκεται σε απόσταση 2,83 km από περιοχή τουριστικής δραστηριότητας. Αντιθέτως, για τις λοιπές δύο θέσεις δεν εντοπίστηκαν περιοχές τουριστικής δραστηριότητας σε σχετική εγγύτητα. Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 7, ενώ η χωρική σχέση μεταξύ των θέσεων και των τουριστικών περιοχών απεικονίζεται στην Εικόνα 9.

Θέση	D _{tour} (m)
Βοσκερό	12000
Επανωσήφης	20000
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	2829

Πίνακας 7: Απόσταση από τουριστικές περιοχές ανά θέση



Εικόνα 9: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από τουριστικές περιοχές

5.3.2.8 Απόσταση από Οριοθετημένους Αρχαιολογικούς Χώρους

Η απόσταση από οριοθετημένους αρχαιολογικούς και πολιτιστικούς χώρους αποτελεί κριτήριο πολιτιστικού και χωρικού χαρακτήρα στη διαδικασία χωροθέτησης αιολικών εγκαταστάσεων. Η συνεκτίμηση της παραμέτρου αυτής αποσκοπεί στη διασφάλιση επαρκούς χωρικής απόστασης μεταξύ ενεργειακών έργων και περιοχών ιδιαίτερης πολιτιστικής σημασίας.

Η σημασία του κριτηρίου τεκμηριώνεται στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), όπου οι αρχαιολογικοί και πολιτιστικοί χώροι εντάσσονται στο πλαίσιο χωρικής πολυκριτηριακής ανάλυσης και λαμβάνουν στάθμιση 0,07, αναδεικνύοντας τον ρόλο τους στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση.

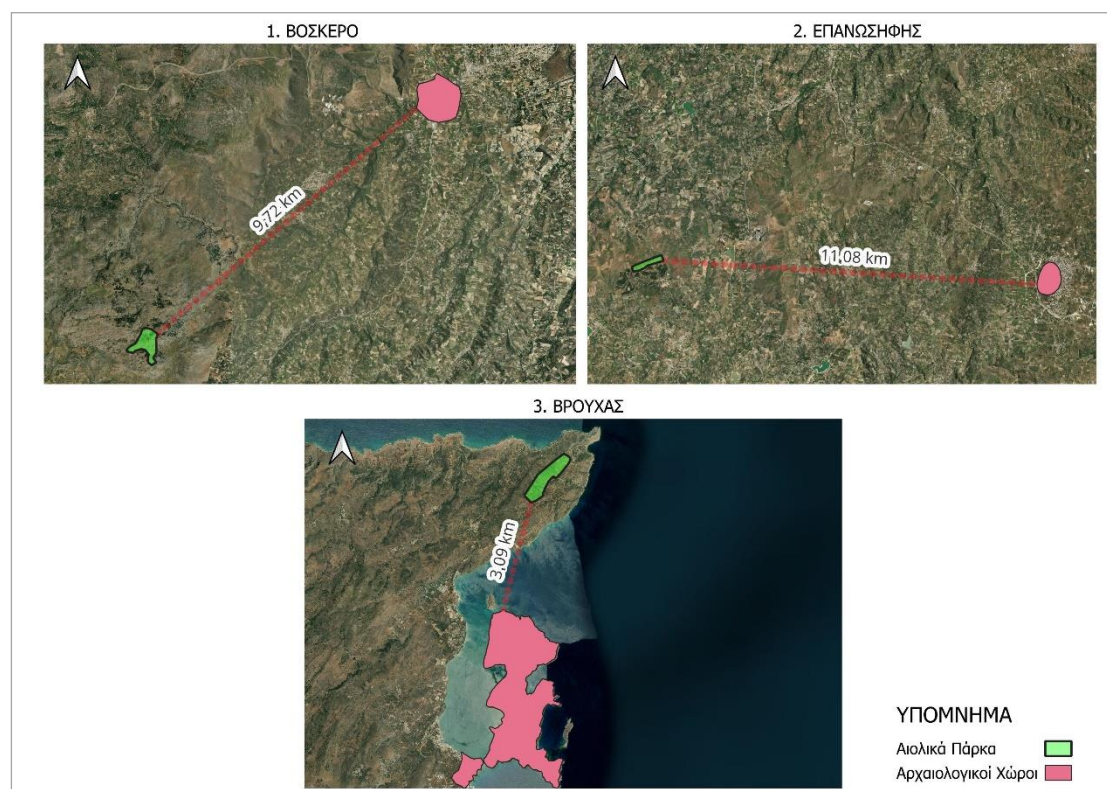
Στην παρούσα μελέτη, το κριτήριο προσδιορίστηκε ως η ελάχιστη οριζόντια απόσταση κάθε υποψήφιας θέσης από οριοθετημένους αρχαιολογικούς χώρους. Τα χωρικά δεδομένα των οριοθετημένων αρχαιολογικών χώρων αντλήθηκαν από τη διαδικτυακή πλατφόρμα ανοικτών δεδομένων της Περιφέρειας Κρήτης και συγκεκριμένα από το σύνολο δεδομένων «Οριοθετημένοι Αρχαιολογικοί Χώροι». Τα δεδομένα εισήχθησαν και επεξεργάστηκαν σε περιβάλλον QGIS για τον υπολογισμό των αποστάσεων.

Από την ανάλυση προέκυψε ότι μόνο η θέση «Ακρωτήρι Αγίου Ιωάννη Βρουχά» παρουσιάζει εγγύτητα σε αρχαιολογικό χώρο και συγκεκριμένα στον αρχαιολογικό χώρο της Ελούντας, σε απόσταση 3,09 km. Αντιθέτως, για τις λοιπές δύο θέσεις δεν εντοπίστηκαν οριοθετημένοι αρχαιολογικοί χώροι σε μικρή απόσταση.

Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 8, ενώ η χωρική σχέση μεταξύ των υποψήφιων θέσεων και των αρχαιολογικών χώρων απεικονίζεται στην Εικόνα 10.

Θέση	D _{arch} (m)
Βοσκερό	9724
Επανωσήφης	11077
Ακρωτήριο Αγ. Ιωάννη Βρουχά	3091

Πίνακας 8: Απόσταση από αρχαιολογικούς χώρους ανά θέση



Εικόνα 10: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από αρχαιολογικούς χώρους

5.3.2.9 Δασικές εκτάσεις

Η παρουσία δασικών εκτάσεων αποτελεί περιβαλλοντικό κριτήριο στη διαδικασία χωροθέτησης αιολικών εγκαταστάσεων, καθώς συνδέεται με παραμέτρους οικολογικής σημασίας και με τον χαρακτήρα χρήσεων γης της εκάστοτε περιοχής. Η συνεκτίμηση του κριτηρίου επιτρέπει την αποτύπωση της περιβαλλοντικής συμβατότητας κάθε θέσης εγκατάστασης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, η παράμετρος των δασικών εκτάσεων αναφέρεται ρητά στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), όπου εντάσσεται στο πλαίσιο χωρικής πολυκριτηριακής ανάλυσης με στάθμιση 0,06. Στην παρούσα εργασία το κριτήριο ενσωματώνεται ως ξεχωριστό περιβαλλοντικό κριτήριο στη διαδικασία αξιολόγησης.

Τα δεδομένα των δασικών εκτάσεων αντλήθηκαν από τη βάση του Ελληνικού Κτηματολογίου και συγκεκριμένα από τους Κυρωμένους Δασικούς Χάρτες. Η αξιολόγηση βασίστηκε στον επίσημο χαρακτηρισμό της κάθε θέσης, όπως αποτυπώνεται στους κυρωμένους χάρτες, χωρίς να απαιτηθεί περαιτέρω χωρική επεξεργασία.

Από τα διαθέσιμα στοιχεία προέκυψε ότι η θέση «Βοσκερό» εμπίπτει σε δασική έκταση με χαρακτηρισμό ΔΔ («Δάση και δασικές εκτάσεις στις αεροφωτογραφίες παλαιότερης λήψης ή προϋφιστάμενα στοιχεία»). Αντίθετα, η θέση «Επανωσήφης» κατατάσσεται εξ ολοκλήρου (100%) σε μη δασική έκταση με χαρακτηρισμό ΠΑ («Τελεσίδικες πράξεις και αποφάσεις χαρακτηρισμού – μη δασικές εκτάσεις»), ενώ η θέση «Ακρωτήρι Αγίου Ιωάννη Βρουχά» κατατάσσεται κατά ποσοστό περίπου 99% στην ίδια κατηγορία. Για τις ανάγκες της πολυκριτηριακής ανάλυσης, το κριτήριο αντιμετωπίστηκε κατηγορικά, με τη δασική έκταση να θεωρείται δυσμενέστερη ως προς την καταλληλότητα χωροθέτησης σε σχέση με τη μη δασική έκταση. Τα αποτελέσματα της κατηγοριοποίησης των εξεταζόμενων θέσεων ως προς τον χαρακτήρα των δασικών εκτάσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 9.

Θέση	Χαρακτηρισμός δασικού χάρτη
Βοσκερό	ΔΔ
Επανωσήφης	ΠΑ, 100%
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	ΠΑ, περίπου 99%

Πίνακας 9: Χαρακτηρισμός δασικών εκτάσεων ανά θέση

5.3.2.10 Απόσταση από περιοχές Natura 2000

Η απόσταση από περιοχές του ευρωπαϊκού οικολογικού δικτύου Natura 2000 αποτελεί κρίσιμο περιβαλλοντικό κριτήριο στη διαδικασία χωροθέτησης αιολικών εγκαταστάσεων, καθώς οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη οικολογική αξία και καθεστώς προστασίας. Η συνεκτίμηση του κριτηρίου αποσκοπεί στη διασφάλιση χωρικής συμβατότητας μεταξύ των ενεργειακών έργων και των προστατευόμενων οικοσυστημάτων.

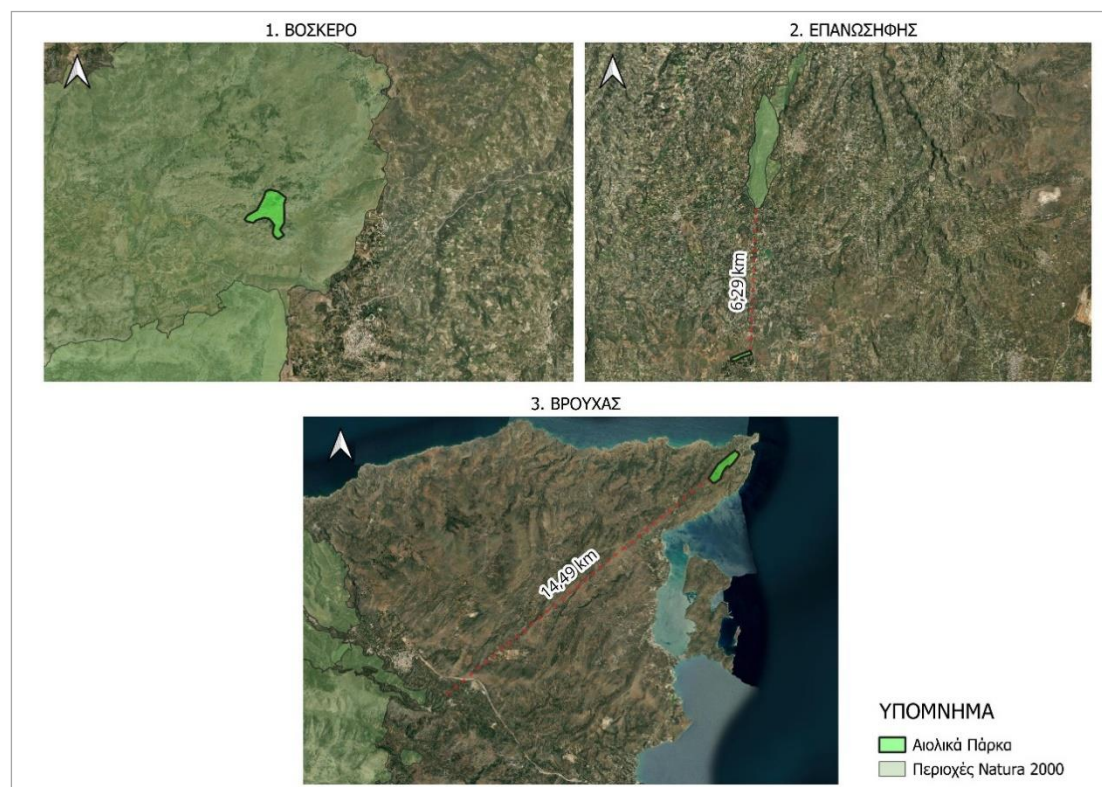
Στη διεθνή βιβλιογραφία, οι προστατευόμενες περιοχές περιλαμβάνονται συστηματικά ως περιβαλλοντικό κριτήριο στις μελέτες πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Οι Josimonić et al. (2023) εντάσσουν τις προστατευόμενες περιοχές ως κριτήριο περιβαλλοντικού περιορισμού στο πλαίσιο εφαρμογής της μεθόδου PROMETHEE, ενώ οι Asadi & Pourhossein (2021) εξετάζουν την απόσταση από προστατευόμενες περιοχές ως διακριτή παράμετρο στο πλαίσιο ανάλυσης AHP, αποδίδοντάς της συγκεκριμένη βαρύτητα.

Στην παρούσα μελέτη, το κριτήριο προσδιορίστηκε ως η ελάχιστη οριζόντια απόσταση κάθε υποψήφιας θέσης από τα όρια περιοχών του δικτύου Natura 2000. Τα πολυγωνικά δεδομένα των περιοχών Natura 2000 αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του European Environment Agency (EEA), που αποτελεί τον επίσημο οργανισμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την παροχή περιβαλλοντικών πληροφοριών.

Τα δεδομένα εισήχθησαν σε περιβάλλον QGIS και χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ελάχιστων αποστάσεων από κάθε εξεταζόμενη θέση. Η αξιολόγηση του κριτηρίου πραγματοποιείται με τρόπο ώστε μεγαλύτερες αποστάσεις από περιοχές Natura 2000 να συνεπάγονται αυξημένη καταλληλότητα της θέσης, δεδομένης της μειωμένης πιθανότητας περιβαλλοντικής επίδρασης. Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 10, ενώ η χωρική σχέση μεταξύ των υποψήφιων θέσεων και των περιοχών Natura 2000 απεικονίζεται στην Εικόνα 11.

Θέση	D _{natura 2000} (m)
Βοσκερό	0 (εντός Natura 2000)
Επανωσήφης	6285
Ακρωτήρι Αγ. Ιωάννη Βρουχά	14486

Πίνακας 10: Απόσταση από περιοχές Natura 2000



Εικόνα 11: Απόσταση θέσεων αιολικών πάρκων από περιοχές Natura 2000

Συνολικά, η διαδικασία προσδιορισμού και ποσοτικοποίησης των κριτηρίων αξιολόγησης οδήγησε στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου συνόλου δεδομένων για τις εξεταζόμενες περιοχές. Τα δεδομένα αυτά, τα οποία αποτυπώνουν τις βασικές τεχνικές, μορφολογικές, περιβαλλοντικές και χωρικές παραμέτρους, αποτελούν τη βάση για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων και η κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης αιολικών πάρκων.

6. Εφαρμογή της Μεθόδου PROMETHEE στη Μελέτη Περίπτωσης

Η επιλογή της καταλληλότερης θέσης εγκατάστασης ανεμογεννητριών αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης απόφασης, στο οποίο εμπλέκονται τεχνικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος εφαρμόστηκε η πολυκριτηριακή μέθοδος PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), η οποία επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων με βάση πολλαπλά και ενίοτε αντικρουόμενα κριτήρια.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Visual PROMETHEE, στο οποίο εισήχθησαν τα κριτήρια αξιολόγησης, οι αντίστοιχες τιμές τους και τα βάρη που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική διερεύνηση.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν τρεις εναλλακτικές θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών στην Κρήτη, συγκεκριμένα οι περιοχές Βοσκορό, Επανωσήφης και Ακρωτήρι Αγίου Ιωάννη Βρουχά. Η επιλογή των θέσεων βασίστηκε κυρίως στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, ώστε να εκπροσωπούν διαφορετικές συνθήκες αναγλύφου, όπως ορεινό, ημιορεινό και παράκτιο ανάγλυφο.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε τρία επίπεδα:

- βασικό σενάριο με χρήση της συνάρτησης προτίμησης τύπου V-shape,
- έλεγχο ευαισθησίας με χρήση της συνάρτησης τύπου Usual,
- εναλλακτικό σενάριο με αυξημένη έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, βασισμένο στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024).

6.1 Κατεύθυνση προτίμησης των κριτηρίων

Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ανάλυση προκύπτουν από τη γεωχωρική επεξεργασία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 και ειδικότερα στην ενότητα 5.3. Τα κριτήρια εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες μέτρησης, όπως μέτρα (m), ποσοστά (%) και τιμές ταχύτητας ανέμου (m/s). Παρότι οι τιμές των κριτηρίων

είναι ήδη ποσοτικοποιημένες και συγκρίσιμες εντός κάθε κριτηρίου, απαιτείται η προσαρμογή τους ώστε να καταστεί δυνατή η συνδυαστική αξιολόγησή τους στο πλαίσιο πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Στη μέθοδο PROMETHEE δεν απαιτείται η εφαρμογή κλασικής γραμμικής κανονικοποίησης (π.χ. μετατροπή των τιμών σε κοινή κλίμακα 0–1). Αντί αυτού, η συγκρισιμότητα των κριτηρίων επιτυγχάνεται μέσω του καθορισμού της κατεύθυνσης προτίμησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) και της χρήσης κατάλληλων συναρτήσεων προτίμησης. Με τον τρόπο αυτό, οι διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών αξιολογούνται άμεσα, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω αριθμητικός μετασχηματισμός των δεδομένων.

Στο στάδιο της προετοιμασίας των κριτηρίων, για κάθε παράμετρο ορίστηκε η κατεύθυνση προτίμησης, δηλαδή αν επιδιώκεται μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση της τιμής της, ανάλογα με τη συμβολή της στην καταλληλότητα των θέσεων εγκατάστασης.

Συγκεκριμένα, κριτήρια όπως η ταχύτητα ανέμου, η απόσταση από περιοχές Natura 2000, η απόσταση από οικισμούς, καθώς και τα κριτήρια που σχετίζονται με κοινωνικές επιπτώσεις (π.χ. τουρισμός και πολιτισμός), ορίστηκαν ως κριτήρια μεγιστοποίησης (max), καθώς μεγαλύτερες τιμές θεωρούνται ευνοϊκές για τη χωροθέτηση.

Αντίθετα, κριτήρια όπως η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ενέργειας, η κλίση του εδάφους και ο χαρακτήρας των δασικών εκτάσεων ορίστηκαν ως κριτήρια ελαχιστοποίησης (min), δεδομένου ότι μικρότερες τιμές συνδέονται με ευκολότερη υλοποίηση και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ο καθορισμός της κατεύθυνσης προτίμησης για κάθε κριτήριο βασίστηκε στη λειτουργική του σημασία και στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει τη συνολική καταλληλότητα των εναλλακτικών θέσεων.

6.2 Προσδιορισμός βαρών κριτηρίων

Ο προσδιορισμός των βαρών των κριτηρίων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια της πολυκριτηριακής ανάλυσης, καθώς εκφράζει τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου στη διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών θέσεων. Η επιλογή των βαρών επηρεάζει άμεσα την τελική κατάταξη και, συνεπώς, απαιτείται τεκμηριωμένη και συστηματική προσέγγιση.

Στην παρούσα εργασία, τα βάρη των κριτηρίων προέκυψαν από ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τη χωροθέτηση αιολικών πάρκων. Για κάθε κριτήριο συλλέχθηκαν οι τιμές βαρών που προτείνονται σε επιλεγμένες επιστημονικές μελέτες και στη συνέχεια υπολογίστηκε αντιπροσωπευτική τιμή.

Τα κριτήρια διακρίθηκαν σε δύο κατηγορίες: (α) βασικά κριτήρια, τα οποία εμφανίζονται συστηματικά στη βιβλιογραφία και σχετίζονται άμεσα με την ενεργειακή και τεχνική καταλληλότητα των θέσεων, και (β) δευτερεύοντα κριτήρια, τα οποία εμφανίζονται σε μικρότερο αριθμό μελετών και αφορούν κυρίως περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες.

Για τον προσδιορισμό των βαρών ακολουθήθηκε διαφοροποιημένη προσέγγιση ανάλογα με τη φύση των κριτηρίων. Συγκεκριμένα, για τα βασικά κριτήρια, τα οποία εμφανίζονται με υψηλή συχνότητα στη βιβλιογραφία, τα βάρη προέκυψαν ως ο μέσος όρος των τιμών που αναφέρονται στις επιλεγμένες επιστημονικές μελέτες, ώστε να αποτυπώνεται η συνολική τάση της βιβλιογραφίας.

Αντίθετα, για τα δευτερεύοντα κριτήρια, τα οποία εμφανίζονται σε μικρότερο αριθμό μελετών και παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαφοροποίηση ως προς τις τιμές τους, εφαρμόστηκε διαδικασία κανονικοποίησης των επιμέρους τιμών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με στόχο την ομαλή ενσωμάτωση των κριτηρίων στο μοντέλο και τη διασφάλιση ότι το άθροισμα των βαρών όλων των κριτηρίων ισούται με 100%.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίστηκε το βάρος κάθε κριτηρίου, μέσω της επεξεργασίας των τιμών που προκύπτουν από τις επιλεγμένες επιστημονικές μελέτες.

6.2.1 Αιολικό δυναμικό

Το κριτήριο του αιολικού δυναμικού αποτελεί το σημαντικότερο ενεργειακό κριτήριο και εμφανίζεται σε όλες σχεδόν τις εξεταζόμενες μελέτες. Από τη βιβλιογραφική ανάλυση προέκυψαν τιμές βαρών από τις μελέτες των Döker et al. (2025), Manolan Kandy et al. (2024), Asadi & Pourhossein (2021), Placide & Lollchund (2024), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020), οι οποίες ανέρχονται σε **0.25, 0.18, 0.43, 0.41, 0.54** και **0.39**.

Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν τη σημαντικότητα του κριτηρίου στη βιβλιογραφία και τη βαρύτητα που αποδίδεται σε αυτό για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των θέσεων. Ο υπολογισμός του μέσου όρου των παραπάνω τιμών οδήγησε σε τελικό βάρος ίσο με **37%**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο βασικό σενάριο της ανάλυσης. Η υψηλή τιμή του βάρους αντανακλά τη θεμελιώδη σημασία του αιολικού δυναμικού για την ενεργειακή απόδοση των ανεμογεννητριών.

6.2.2 Απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το κριτήριο της απόστασης από τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί βασικό τεχνικο-οικονομικό παράγοντα, καθώς επηρεάζει άμεσα το κόστος σύνδεσης των ανεμογεννητριών με το δίκτυο.

Από τη βιβλιογραφική ανάλυση προέκυψαν τιμές βαρών από τις μελέτες Döker et al. (2025), Manolan Kandy et al. (2024), Asadi & Pourhossein (2021), Placide & Lollchund (2024), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020), οι οποίες ανέρχονται σε **0.17, 0.07, 0.22, 0.13, 0.24** και **0.28**.

Οι τιμές αυτές αποτυπώνουν τη σημασία του κριτηρίου στη βιβλιογραφία, καθώς σχετίζεται άμεσα με την οικονομική βιωσιμότητα των εγκαταστάσεων. Ο υπολογισμός του μέσου όρου των παραπάνω τιμών οδήγησε σε τελικό βάρος ίσο με **19%**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο βασικό σενάριο της ανάλυσης.

Η τιμή αυτή αντανακλά τη σημασία της εγγύτητας στο δίκτυο μεταφοράς, η οποία συμβάλλει στη μείωση του κόστους υποδομών και στη διευκόλυνση της υλοποίησης των έργων.

6.2.3 Απόσταση από οδικό δίκτυο

Το κριτήριο της απόστασης από το οδικό δίκτυο αποτελεί σημαντικό παράγοντα που σχετίζεται με την προσβασιμότητα της θέσης και το κόστος κατασκευής και συντήρησης των ανεμογεννητριών.

Από τη βιβλιογραφική ανάλυση προέκυψαν τιμές βαρών από τις μελέτες Döker et al. (2025), Manolan Kandy et al. (2024), Asadi & Pourhossein (2021), Placide & Lollchund (2024), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020), οι οποίες ανέρχονται σε **0.14, 0.05, 0.10, 0.08, 0.09 και 0.14**.

Η σχετική βαρύτητα του κριτηρίου συνδέεται με το γεγονός ότι η εγγύτητα στο οδικό δίκτυο διευκολύνει την πρόσβαση και μειώνει το κόστος υλοποίησης του έργου. Ο υπολογισμός του μέσου όρου των παραπάνω τιμών οδήγησε σε τελικό βάρος ίσο με **10%**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο βασικό σενάριο της ανάλυσης.

6.2.4 Απόσταση από πλησιέστερο οικισμό

Το κριτήριο της απόστασης από οικισμούς αποτελεί σημαντικό κοινωνικό και χωροταξικό παράγοντα, καθώς σχετίζεται με την αποδοχή των έργων από τις τοπικές κοινωνίες και τη μείωση των πιθανών επιπτώσεων στο ανθρωπογενές περιβάλλον.

Από τη βιβλιογραφική ανάλυση προέκυψαν τιμές βαρών από τις μελέτες Döker et al. (2025), Manolan Kandy et al. (2024), Asadi & Pourhossein (2021), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020), οι οποίες ανέρχονται σε **0.06, 0.09, 0.06, 0.08 και 0.07**.

Η σχετική σημασία του κριτηρίου αποτυπώνεται στη συχνή παρουσία του στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς η επαρκής απόσταση από κατοικημένες περιοχές συμβάλλει στον περιορισμό πιθανών οχλήσεων, όπως οπτικών και ακουστικών, και ενισχύει την

κοινωνική αποδοχή των έργων. Από τον υπολογισμό του μέσου όρου των παραπάνω τιμών προέκυψε τελικό βάρος ίσο με **7%**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο βασικό σενάριο της ανάλυσης.

6.2.5 Μέση κλίση εδάφους

Το κριτήριο της μέσης κλίσης του εδάφους αποτελεί σημαντικό τεχνικό παράγοντα, καθώς επηρεάζει άμεσα τη δυνατότητα εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, καθώς και το κόστος κατασκευής των απαραίτητων υποδομών.

Από τη βιβλιογραφική ανάλυση προέκυψαν τιμές βαρών από τις μελέτες Döker et al. (2025), Asadi & Pourhossein (2021), Placide & Lollchund (2024), Albraheem & AlAwlaqi (2023) και Moradi et al. (2020), οι οποίες ανέρχονται σε **0.10, 0.14, 0.24, 0.06 και 0.04**.

Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν τη σημασία του κριτηρίου στη βιβλιογραφία, καθώς η μικρότερη κλίση του εδάφους διευκολύνει την εγκατάσταση και μειώνει τις τεχνικές δυσκολίες και το κόστος υλοποίησης. Ο υπολογισμός του μέσου όρου των παραπάνω τιμών οδήγησε σε τελικό βάρος ίσο με **12%**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο βασικό σενάριο της ανάλυσης.

6.2.6 Ύψόμετρο

Το κριτήριο του υψομέτρου αποτελεί δευτερεύον παράγοντα αξιολόγησης, ο οποίος σχετίζεται με τις γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής.

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση προέκυψε ότι το κριτήριο αυτό εμφανίζεται σε περιορισμένο αριθμό μελετών. Συγκεκριμένα, στη μελέτη των Placide & Lollchund (2024) αποδίδεται βάρος ίσο με 0,04.

Δεδομένου ότι το κριτήριο δεν εμφανίζεται με την ίδια συχνότητα όπως τα βασικά κριτήρια, η τιμή αυτή προσαρμόστηκε προκειμένου να ενταχθεί ομαλά στο σύνολο των κριτηρίων. Μετά την κανονικοποίηση, το τελικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε στο

μοντέλο ανέρχεται σε **2%**. Η χαμηλή τιμή του βάρους αντανακλά τη συμπληρωματική σημασία του κριτηρίου στη διαδικασία αξιολόγησης.

6.2.7 Απόσταση από περιοχές τουριστικής δραστηριότητας

Το κριτήριο της απόστασης από περιοχές τουριστικής δραστηριότητας αποτελεί σημαντικό κοινωνικό και οικονομικό παράγοντα, καθώς σχετίζεται με την προστασία του τουριστικού τοπίου και την αποφυγή αρνητικών επιπτώσεων σε περιοχές με υψηλή τουριστική αξία.

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση προέκυψε ότι το συγκεκριμένο κριτήριο εξετάζεται στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), όπου αποδίδεται βάρος ίσο με 0,10.

Το κριτήριο εμφανίζεται σε περιορισμένο αριθμό μελετών και, για τον λόγο αυτό, η αρχική τιμή του βάρους προσαρμόστηκε μέσω κανονικοποίησης, ώστε να ενσωματωθεί στο συνολικό μοντέλο αξιολόγησης. Το τελικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση ανέρχεται σε **4%**.

6.2.8 Απόσταση από οριοθετημένους αρχαιολογικούς χώρους

Το κριτήριο της απόστασης από οριοθετημένους αρχαιολογικούς χώρους αποτελεί σημαντικό πολιτιστικό και κοινωνικό παράγοντα, καθώς σχετίζεται με την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς και την αποφυγή επιπτώσεων σε περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση προέκυψε ότι το συγκεκριμένο κριτήριο εξετάζεται στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), όπου αποδίδεται βάρος ίσο με 0,07.

Λόγω της περιορισμένης παρουσίας του κριτηρίου στη διεθνή βιβλιογραφία, η αρχική τιμή του βάρους προσαρμόστηκε μέσω κανονικοποίησης, προκειμένου να ενσωματωθεί ισορροπημένα στο σύνολο των κριτηρίων. Μετά την προσαρμογή, το τελικό βάρος του κριτηρίου διαμορφώθηκε σε **3%**.

6.2.9 Δασικές εκτάσεις

Το κριτήριο των δασικών εκτάσεων αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα, καθώς σχετίζεται με την προστασία των φυσικών οικοσυστημάτων και την αποφυγή παρεμβάσεων σε περιοχές με υψηλή οικολογική αξία.

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση προέκυψε ότι το συγκεκριμένο κριτήριο εξετάζεται στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), όπου αποδίδεται βάρος ίσο με 0,06.

Το κριτήριο των δασικών εκτάσεων εμφανίζεται κυρίως σε πιο περιβαλλοντικά προσανατολισμένες προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας. Για τον λόγο αυτό, η αρχική τιμή του βάρους προσαρμόστηκε μέσω κανονικοποίησης, ώστε να ενταχθεί ισορροπημένα στο συνολικό μοντέλο αξιολόγησης. Μετά την προσαρμογή, το τελικό βάρος του κριτηρίου διαμορφώθηκε σε **3%**.

6.2.10 Απόσταση από περιοχές Natura 2000

Το κριτήριο της απόστασης από περιοχές Natura 2000 αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα, καθώς σχετίζεται με την προστασία οικοσυστημάτων και περιοχών ιδιαίτερης οικολογικής αξίας. Η συνεκτίμησή του στο πλαίσιο της πολυκριτηριακής αξιολόγησης αποσκοπεί στην ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής διάστασης στη διαδικασία επιλογής κατάλληλων θέσεων για την ανάπτυξη αιολικών εγκαταστάσεων.

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση προέκυψε ότι η προστασία ευαίσθητων και προστατευόμενων περιοχών ενσωματώνεται σε διαφορετικές μορφές στις εξεταζόμενες μελέτες. Ειδικότερα, στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024) δεν χρησιμοποιείται αυτοτελές κριτήριο με την ονομασία «Natura 2000», αλλά περιλαμβάνονται οι παράγοντες “Wetlands” και “Other protected and valuable nature areas”, στους οποίους αποδίδονται μέσες τιμές βαρών 0,04 και 0,08, αντίστοιχα. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, οι δύο αυτοί παράγοντες θεωρήθηκαν από κοινού ως η πλησιέστερη λειτουργική αντιστοίχιση προς το κριτήριο της απόστασης από περιοχές Natura 2000.

Στο βασικό σενάριο της παρούσας ανάλυσης, το κριτήριο ενσωματώθηκε με τελικό βάρος 3%, στο πλαίσιο της συνολικής κατανομής των δέκα κριτηρίων. Στο εναλλακτικό σενάριο που βασίζεται στην προσέγγιση των Manolan Kandy et al. (2024), οι δύο παραπάνω περιβαλλοντικοί παράγοντες συνδυάστηκαν και το άθροισμα των αρχικών βαρών τους, ίσο με 0,12, επανακανονικοποιήθηκε μαζί με τα υπόλοιπα επιλεγμένα κριτήρια. Μετά την κανονικοποίηση, το αντίστοιχο βάρος διαμορφώθηκε σε 16%.

Συνοψίζοντας, τα βάρη των κριτηρίων προέκυψαν μέσω συνδυασμού βιβλιογραφικής ανάλυσης και διαδικασίας κανονικοποίησης, με στόχο τη διαμόρφωση ενός ισορροπημένου και αντιπροσωπευτικού μοντέλου αξιολόγησης. Παρατηρείται ότι τα βασικά κριτήρια συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό βαρύτητας, ενώ τα δευτερεύοντα κριτήρια συμβάλλουν συμπληρωματικά, ενσωματώνοντας περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες.

Κριτήριο	Βάρος
Αιολικό δυναμικό	37%
Απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκ. ενέργειας	19%
Απόσταση από οδικό δίκτυο	10%
Απόσταση από πλησιέστερο οικισμό	7%
Μέση κλίση εδάφους	12%
Υψόμετρο	2%
Απόσταση από περιοχές τουριστικής δραστηριότητας	4%
Απόσταση από οριοθ. αρχαιολ. χώρους	3%
Δασικές εκτάσεις	3%
Απόσταση από περιοχές Natura 2000	3%

Πίνακας 11: Κατανομή βαρών κριτηρίων βασικής επίλυσης

Επιπλέον, στο πλαίσιο της ανάλυσης εξετάστηκε και εναλλακτικό σενάριο, το οποίο βασίζεται σε προσέγγιση με αυξημένη έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια. Στο σενάριο αυτό, τα βάρη των κριτηρίων προέκυψαν από τη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024).

Δεδομένου ότι δεν ήταν δυνατή η πλήρης αντιστοίχιση των παραγόντων της μελέτης των Manolan Kandy et al. (2024) με τα δέκα κριτήρια της παρούσας εργασίας, στο εναλλακτικό σενάριο χρησιμοποιήθηκαν τα οκτώ κριτήρια της παρούσας ανάλυσης για τα οποία υπήρχε σαφής ή λειτουργικά ισοδύναμη αντιστοίχιση. Οι αντίστοιχες τιμές των βαρών επανακανονικοποιήθηκαν, ώστε να διατηρηθούν οι μεταξύ τους σχετικές αναλογίες και το άθροισμά τους να ισούται με 100%.

Το εναλλακτικό αυτό σενάριο χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της επίδρασης μιας περισσότερο περιβαλλοντικά και κοινωνικά προσανατολισμένης προσέγγισης στη διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών θέσεων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα επανακανονικοποιημένα βάρη των οκτώ κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στο εναλλακτικό σενάριο, βάσει της στάθμισης των αντίστοιχων παραγόντων στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024).

Κριτήριο	Βάρος
Αιολικό δυναμικό	24%
Απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκ. ενέργειας	9,5%
Απόσταση από οδικό δίκτυο	7%
Απόσταση από πλησιέστερο οικισμό	12%
Απόσταση από περιοχές τουριστικής δραστηριότητας	14%
Απόσταση από οριοθ. αρχαιολ. χώρους	9,5%
Δασικές εκτάσεις	8%
Απόσταση από περιοχές Natura 2000 (υγρότοποι και άλλες προστατευόμενες περιοχές)	16%

Πίνακας 12: Προσαρμοσμένα βάρη εναλλακτικής επίλυσης

6.3 Εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE για την αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Visual PROMETHEE Academic, στο οποίο εισήχθησαν οι εναλλακτικές θέσεις, τα κριτήρια αξιολόγησης, οι τιμές τους και τα αντίστοιχα βάρη.

Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια:

- 1) βασική επίλυση με χρήση δέκα κριτηρίων και συνάρτησης προτίμησης τύπου V-shape,
- 2) έλεγχος ευαισθησίας με χρήση της συνάρτησης τύπου Usual,
- 3) εναλλακτική επίλυση με έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, βάσει της μελέτης των Manolan Kandy et al. (2024).

6.3.1 Βασική επίλυση με συνάρτηση V-shape

Η βασική επίλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση και των δέκα κριτηρίων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς και των αντίστοιχων βαρών που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανάλυση.

Για την αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλέχθηκε η συνάρτηση προτίμησης τύπου **V-shape**, η οποία θεωρείται κατάλληλη για συνεχή ποσοτικά δεδομένα, καθώς επιτρέπει τη σταδιακή έκφραση της προτίμησης ανάλογα με το μέγεθος της διαφοράς μεταξύ των εναλλακτικών.

Η επιλογή της συγκεκριμένης συνάρτησης βασίζεται στο γεγονός ότι τα κριτήρια της ανάλυσης, όπως π.χ. η ταχύτητα ανέμου, οι αποστάσεις και η κλίση εδάφους εκφράζονται σε συνεχείς μεταβλητές, για τις οποίες η ένταση της προτίμησης αυξάνεται προοδευτικά και όχι απότομα.

Επιπλέον, για την εφαρμογή της συνάρτησης προτίμησης τύπου V-shape ορίστηκε κατώφλι προτίμησης (preference threshold), το οποίο αντιστοιχεί στο 60% του εύρους τιμών κάθε κριτηρίου. Η επιλογή αυτή βασίζεται στη λογική ότι μικρές διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών δεν θα πρέπει να οδηγούν σε ισχυρή προτίμηση, ενώ μεγαλύτερες διαφορές θα πρέπει να αποτυπώνονται με αυξημένη ένταση.

Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται ο περιορισμός της υπερευαισθησίας του μοντέλου σε μικρές αποκλίσεις των τιμών και η σταδιακότερη διαφοροποίηση των εναλλακτικών. Η χρήση ενός ενιαίου ποσοστού κατωφλίου για όλα τα κριτήρια συμβάλλει στη

διατήρηση της συνοχής του μοντέλου και στη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Στο λογισμικό εισήχθησαν οι τιμές των κριτηρίων, τα βάρη και οι συναρτήσεις προτίμησης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Scenario1	Wind speed	Distance grid	Distance road	Distance set...	Slope	Elevation	Tourism dist...	Archaeology...	Forest land	Distance Nat...
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences										
Min/Max	max	min	min	max	min	max	max	max	min	max
Weight	0,37	0,19	0,10	0,07	0,12	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03
Preference Fn.	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	1,20	3550,00	1700,00	530,00	4,80	540,00	10300,00	4800,00	0,60	8700,00
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics										
Minimum	10,47	8028,00	157,00	1024,00	21,40	300,00	2829,00	3091,00	0,00	0,00
Maximum	12,46	13948,00	2981,00	1900,00	29,40	1194,00	20000,00	11077,00	1,00	14486,00
Average	11,39	10600,33	2031,00	1329,00	26,13	724,67	11609,67	7964,00	0,34	7103,67
Standard Dev.	0,82	2478,23	1325,16	404,07	3,43	366,34	7015,46	3489,72	0,47	5917,17
Evaluations										
☒ Voskero	11,23	8028,00	2981,00	1900,00	29,40	1194,00	12000,00	9724,00	1,00	0,00
☒ Epanosifis	10,47	9825,00	157,00	1024,00	27,60	680,00	20000,00	11077,00	0,00	6825,00
☒ Vrouxas	12,46	13948,00	2955,00	1063,00	21,40	300,00	2829,00	3091,00	0,01	14486,00

Εικόνα 12: Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων βασικής επίλυσης στο Visual PROMETHEE Academic

6.3.2 Έλεγχος με συνάρτηση Usual

Για τον έλεγχο της ευαισθησίας του μοντέλου ως προς τη μορφή της συνάρτησης προτίμησης, πραγματοποιήθηκε εναλλακτική επίλυση με χρήση της συνάρτησης τύπου Usual. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δέκα κριτήρια και τα ίδια βάρη, όπως στο βασικό σενάριο, ενώ μεταβλήθηκε αποκλειστικά η μορφή της συνάρτησης προτίμησης για όλα τα κριτήρια.

Η συνάρτηση Usual αποτελεί την απλούστερη μορφή συνάρτησης προτίμησης, στην οποία οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ δύο εναλλακτικών οδηγεί άμεσα σε προτίμηση, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το μέγεθος της διαφοράς. Η εφαρμογή της συνάρτησης αυτής πραγματοποιήθηκε με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα της βασικής επίλυσης και την αξιολόγηση της σταθερότητας του μοντέλου.

6.3.3 Εναλλακτική επίλυση βάσει Manolan Kandy et al. (2024)

Στο τρίτο στάδιο της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε εναλλακτική επίλυση, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης μιας προσέγγισης που δίνει αυξημένη έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια στη διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών θέσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα βάρη που προκύπτουν από τη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), τα οποία διαφοροποιούνται από το βασικό σενάριο, καθώς αποδίδουν μεγαλύτερη σημασία σε κριτήρια περιβαλλοντικής προστασίας και κοινωνικών επιπτώσεων. Παράλληλα, επιλέχθηκαν οκτώ από τα δέκα αρχικά κριτήρια, για τα οποία υπήρχε σαφής αντιστοίχιση, ενώ τα βάρη τους προσαρμόστηκαν μέσω κανονικοποίησης ώστε να διατηρείται η συνοχή του μοντέλου και το άθροισμά τους να ισούται με 100%.

Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση της συνάρτησης προτίμησης τύπου V-shape, προκειμένου να διατηρηθεί η συγκρισιμότητα με το βασικό σενάριο. Με τον τρόπο αυτό, η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων αποδίδεται τόσο στην ανακατανομή των βαρών όσο και στη διαφορετική σύνθεση των κριτηρίων. Στο λογισμικό εισήχθησαν τα αντίστοιχα δεδομένα, όπως παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

Visual PROMETHEE Academic - Windfarm_SiteSelection_Promethee.vpg (saved)											
File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help											
Scenario1	Wind speed	Distance grid	Distance road	Distance set...	Slope	Elevation	Tourism dist...	Archaeology...	Forest land	Distance Nat...	
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Preferences											
Min/Max	max	min	min	max	min	max	max	max	min	max	
Weight	0,24	0,10	0,07	0,12	0,14	0,01	0,14	0,10	0,08	0,16	
Preference Fn.	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
- P: Preference	1,20	3550,00	1700,00	530,00	4,80	540,00	10300,00	4800,00	0,60	8700,00	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics											
Minimum	10,47	8028,00	157,00	1024,00	21,40	300,00	2829,00	3091,00	0,00	0,00	
Maximum	12,46	13948,00	2981,00	1900,00	29,40	1194,00	20000,00	11077,00	1,00	14486,00	
Average	11,39	10600,33	2031,00	1329,00	26,13	724,67	11609,67	7964,00	0,34	7103,67	
Standard Dev.	0,82	2478,23	1325,16	404,07	3,43	366,34	7015,46	3489,72	0,47	5917,17	
Evaluations											
Voskero	11,23	8028,00	2981,00	1900,00	29,40	1194,00	12000,00	9724,00	1,00	0,00	
Epanosifis	10,47	9825,00	157,00	1024,00	27,60	680,00	20000,00	11077,00	0,00	6825,00	
Vrouxas	12,46	13948,00	2955,00	1063,00	21,40	300,00	2829,00	3091,00	0,01	14486,00	

Εικόνα 13: Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων εναλλακτικής επίλυσης στο Visual PROMETHEE Academic

6.4 Ιεράρχηση και συγκριτική αξιολόγηση θέσεων

Στο παρόν στάδιο της ανάλυσης εξετάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE και πραγματοποιείται η συγκριτική ιεράρχηση των εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Η ανάλυση βασίζεται στα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν: το βασικό σενάριο με συνάρτηση V-shape, τον έλεγχο με συνάρτηση Usual και το εναλλακτικό σενάριο με αυξημένη έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται μέσω των ροών υπεροχής (flows), των πινάκων κατάταξης και των διαγραμμάτων της μεθόδου, τα οποία επιτρέπουν την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων.

6.4.1 Αποτελέσματα βασικού σεναρίου (V-shape)

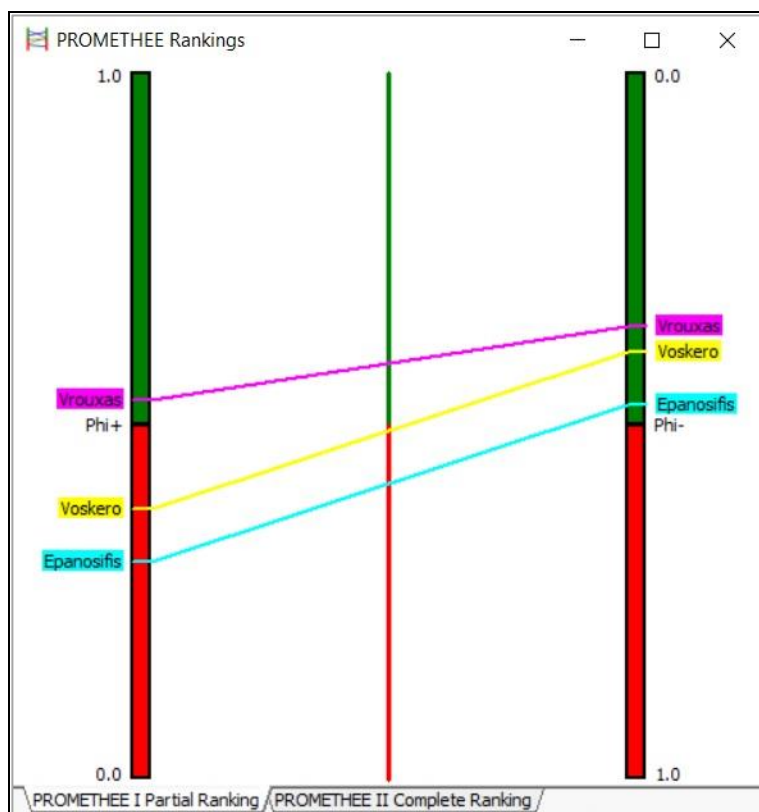
Στο βασικό σενάριο, η αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων πραγματοποιήθηκε με χρήση και των δέκα κριτηρίων και των αντίστοιχων βαρών, όπως αυτά προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για την ανάλυση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων αξιοποιήθηκαν τα εργαλεία που παρέχει η μέθοδος PROMETHEE.

Αρχικά, εξετάζεται το εργαλείο **PROMETHEE rankings**, το οποίο περιλαμβάνει τόσο τη μερική κατάταξη (PROMETHEE I) όσο και την ολική κατάταξη (PROMETHEE II) των εναλλακτικών.

- **PROMETHEE rankings**

Η μέθοδος PROMETHEE I (Εικόνα 14) αποδίδει τη μερική κατάταξη των εναλλακτικών, λαμβάνοντας υπόψη ξεχωριστά τις θετικές (Φ^+) και αρνητικές (Φ^-) ροές υπεροχής. Μέσω της προσέγγισης αυτής, είναι δυνατή η σύγκριση των εναλλακτικών ως προς την ικανότητά τους να υπερέχουν έναντι των άλλων, αλλά και ως προς το βαθμό στον οποίο υστερούν, χωρίς να οδηγεί απαραίτητα σε πλήρη ιεράρχηση.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι η θέση **Βρουχάς** παρουσιάζει υψηλή θετική ροή και χαμηλή αρνητική, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρή συνολική επίδοση. Η θέση **Βοσκερό** εμφανίζει ενδιάμεση συμπεριφορά, με μέτρια θετική και αρνητική ροή, ενώ η θέση **Επανωσήφης** παρουσιάζει χαμηλή θετική και αυξημένη αρνητική ροή, γεγονός που την κατατάσσει ως λιγότερο ευνοϊκή επιλογή.

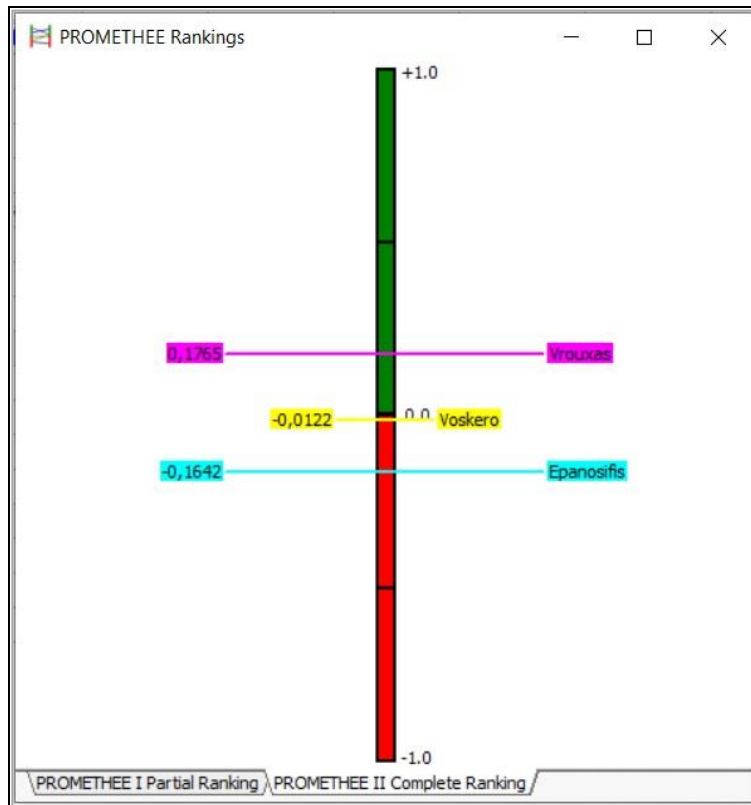


Εικόνα 14: Μερική κατάταξη εναλλακτικών θέσεων (PROMETHEE I) βασικού σεναρίου

Η μέθοδος PROMETHEE II (Εικόνα 15) παρέχει την ολική κατάταξη των εναλλακτικών, βασιζόμενη στην καθαρή ροή υπεροχής (Φ), η οποία προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ θετικής και αρνητικής ροής. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε πλήρη ιεράρχηση των εναλλακτικών, επιτρέποντας την άμεση σύγκρισή τους.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η θέση **Βρουχάς** καταλαμβάνει την πρώτη θέση, παρουσιάζοντας τη μεγαλύτερη καθαρή ροή ($\Phi = 0,1765$), γεγονός που υποδηλώνει ότι υπερέχει συνολικά έναντι των υπολοίπων. Ακολουθεί η θέση **Βοσκερό** με τιμή κοντά

στο μηδέν ($\Phi = -0,0122$), γεγονός που υποδηλώνει σχετική ισορροπία μεταξύ πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων, ενώ η θέση **Επανωσήφης** καταλαμβάνει την τελευταία θέση ($\Phi = -0,1642$), παρουσιάζοντας τη χαμηλότερη συνολική επίδοση.

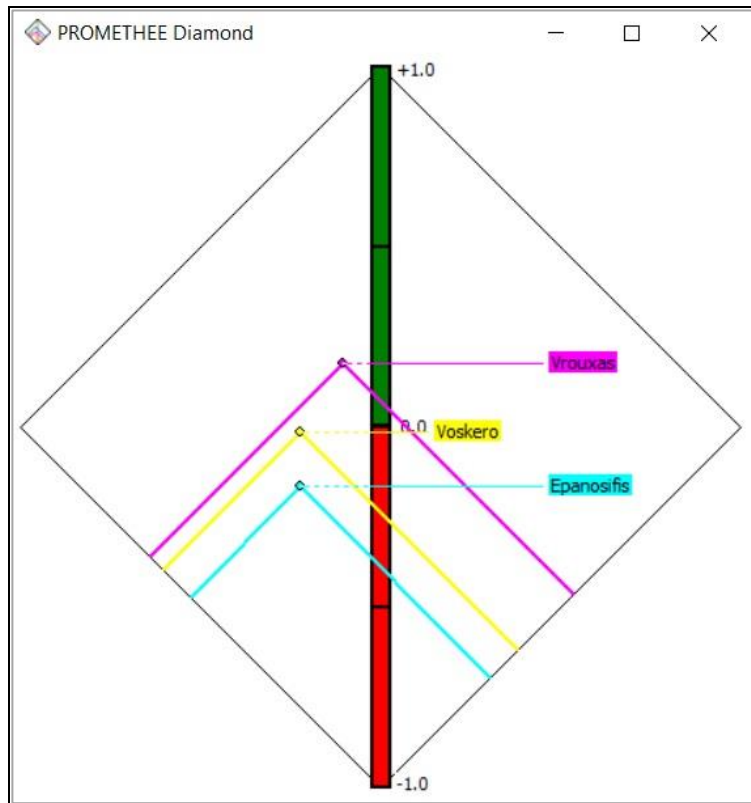


Εικόνα 15: Ολική κατάταξη εναλλακτικών θέσεων (PROMETHEE II) βασικού σεναρίου

- **PROMETHEE Diamond**

Στο διάγραμμα **PROMETHEE Diamond** (Εικόνα 16) αποτυπώνεται η θέση των τριών εναλλακτικών περιοχών με βάση τις θετικές (Φ^+) και αρνητικές (Φ^-) ροές υπεροχής. Η απεικόνιση αυτή επιτρέπει τη συνδυαστική ερμηνεία των δύο ροών, ενώ η θέση κάθε εναλλακτικής στον κατακόρυφο άξονα εκφράζει την τιμή της καθαρής ροής υπεροχής (Φ). Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η θέση **Βρουχάς** καταλαμβάνει την υψηλότερη θέση και εμφανίζει τη μεγαλύτερη καθαρή ροή, γεγονός που την καθιστά την πλέον

κατάλληλη εναλλακτική για χωροθέτηση ανεμογεννητριών. Η θέση **Βοσκερό** ακολουθεί σε ενδιάμεση θέση, με σχεδόν ουδέτερη προς ελαφρώς θετική καθαρή ροή, ενώ η θέση **Επανωσήφης** κατατάσσεται χαμηλότερα, παρουσιάζοντας αρνητική καθαρή ροή και, κατά συνέπεια, τη μικρότερη συνολική καταλληλότητα μεταξύ των τριών εναλλακτικών.

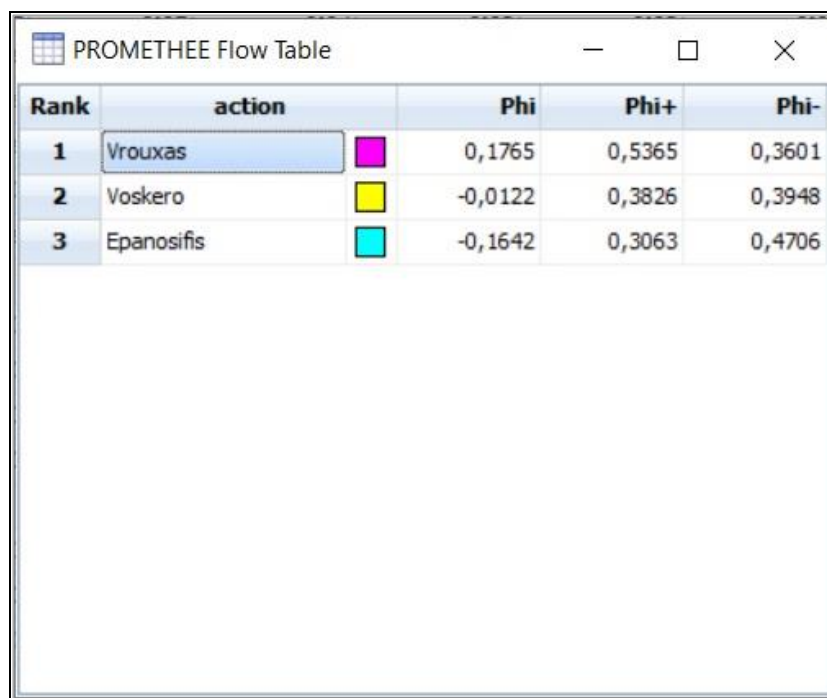


Εικόνα 16: Διάγραμμα PROMETHEE Diamond βασικού σεναρίου

- **PROMETHEE Flow Table**

Ο πίνακας **PROMETHEE Flow Table** (Εικόνα 17) παρουσιάζει τις θετικές (Φ^+), αρνητικές (Φ^-) και την καθαρή ροή υπεροχής (Φ) για κάθε εναλλακτική, μέσω των οποίων προκύπτει η συνολική τους κατάταξη, καθώς η καθαρή ροή εκφράζει τη συνολική επίδοση λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον βαθμό υπεροχής όσο και υστέρησης έναντι των λοιπών επιλογών. Στη συγκεκριμένη ανάλυση, η περιοχή **Βρουχάς** εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή καθαρής ροής ($\Phi = 0,1765$) και κατατάσσεται πρώτη,

αποτελώντας την καταλληλότερη επιλογή για χωροθέτηση ανεμογεννητριών, ενώ η περιοχή **Βοσκερό** παρουσιάζει σχεδόν ουδέτερη επίδοση ($\Phi = -0,0122$) και καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση. Τέλος, η περιοχή **Επανωσήφης** εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή ($\Phi = -0,1642$), κατατάσσεται τελευταία και θεωρείται η λιγότερο κατάλληλη εναλλακτική.



Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Vrouxas	0,1765	0,5365	0,3601
2	Voskero	-0,0122	0,3826	0,3948
3	Epanosifs	-0,1642	0,3063	0,4706

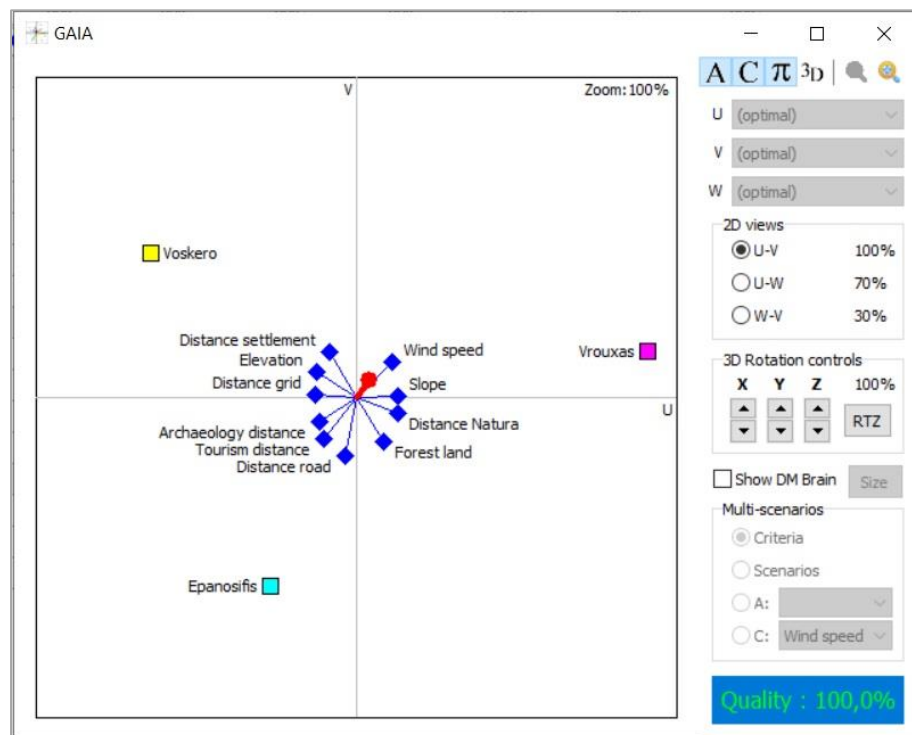
Εικόνα 17: Αποτελέσματα PROMETHEE Flow Table βασικού σεναρίου

- **PROMETHEE GAIA**

Στο διάγραμμα **PROMETHEE GAIA** (Εικόνα 18) απεικονίζονται οι εναλλακτικές περιοχές και τα κριτήρια αξιολόγησης, παρέχοντας μια συνολική εικόνα των μεταξύ τους σχέσεων. Η υψηλή τιμή ποιότητας της απεικόνισης (Quality: 100,0%) υποδηλώνει ότι η δισδιάστατη αναπαράσταση αποτυπώνει με πληρότητα την πληροφορία της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Όσον αφορά τα κριτήρια, παρατηρείται ότι το αιολικό δυναμικό (wind speed), η κλίση (slope) και η απόσταση από περιοχές Natura κατευθύνονται προς την πλευρά της

περιοχής Βρουχάς, γεγονός που υποδηλώνει ότι συμβάλλουν θετικά στην αξιολόγησή της. Αντίθετα, ορισμένα κριτήρια όπως οι αποστάσεις από υποδομές ή χρήσεις γης εμφανίζονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις, υποδηλώνοντας συγκρουόμενες επιδράσεις μεταξύ των κριτηρίων. Συνολικά, το διάγραμμα επιβεβαιώνει τη διαφοροποίηση των περιοχών και αναδεικνύει τα κριτήρια που επηρεάζουν περισσότερο την τελική κατάταξη.

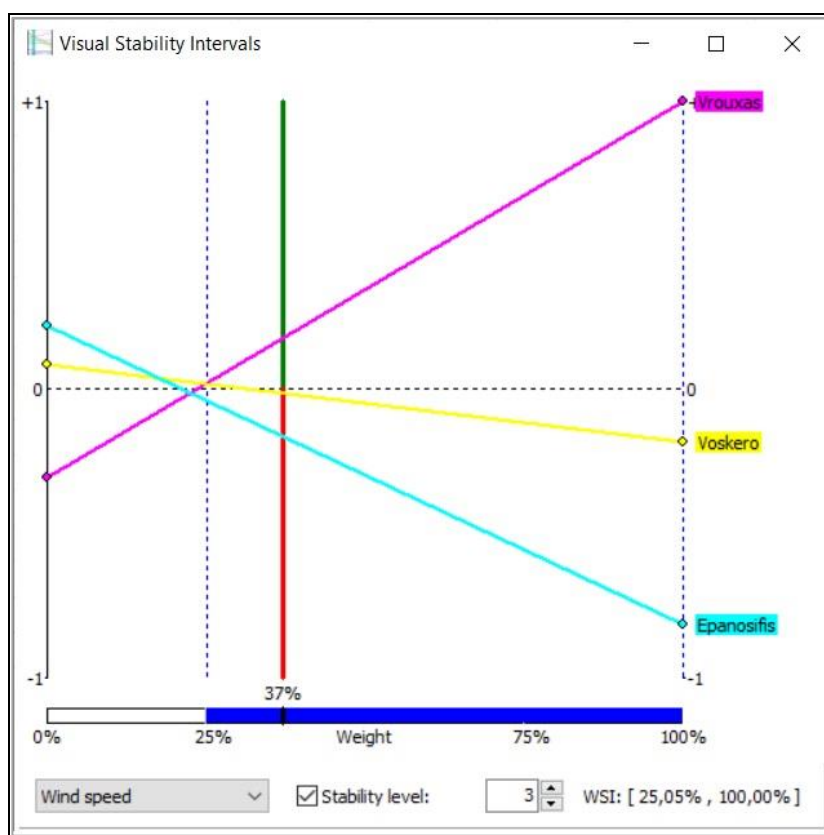


Εικόνα 18: Ανάλυση PROMETHEE GAIA βασικού σεναρίου

- **Visual Stability Intervals**

Τα διαγράμματα **Visual Stability Intervals (VSI)** χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της μεθόδου PROMETHEE ως προς τις μεταβολές των βαρών των κριτηρίων. Μέσω των διαγραμμάτων αυτών εξετάζεται κατά πόσο η τελική κατάταξη των εναλλακτικών παραμένει σταθερή όταν μεταβάλλεται το βάρος ενός κριτηρίου, επιτρέποντας την εκτίμηση της αξιοπιστίας και της σταθερότητας των

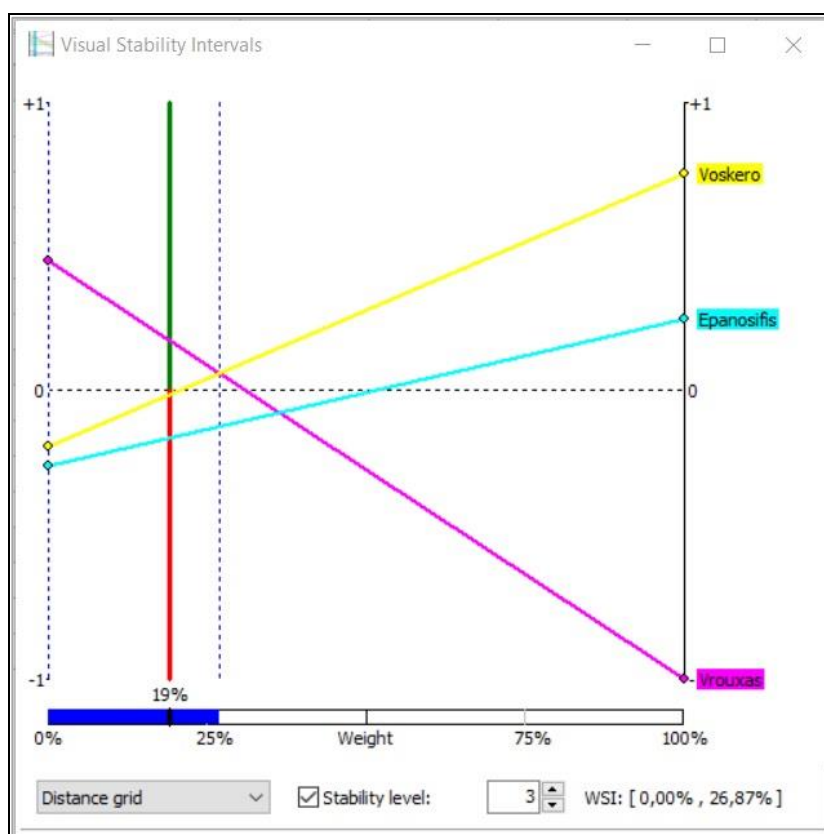
αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία, για λόγους συνοπτικής παρουσίασης, εξετάζονται ενδεικτικά τα κύρια κριτήρια αξιολόγησης. Στο διάγραμμα ευαισθησίας για το κριτήριο **αιολικό δυναμικό** (Εικόνα 19), η περιοχή **Βρουχάς** εμφανίζει σταθερά την υψηλότερη επίδοση, ενώ η περιοχή **Επανωσήφης** τη χαμηλότερη. Το μεγάλο εύρος σταθερότητας (WSI: 25,05% – 100,00%) δείχνει ότι η κατάταξη δεν επηρεάζεται σημαντικά από μεταβολές του βάρους, αναδεικνύοντας το κριτήριο ως ιδιαίτερα καθοριστικό.



Εικόνα 19: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο αιολικού δυναμικού

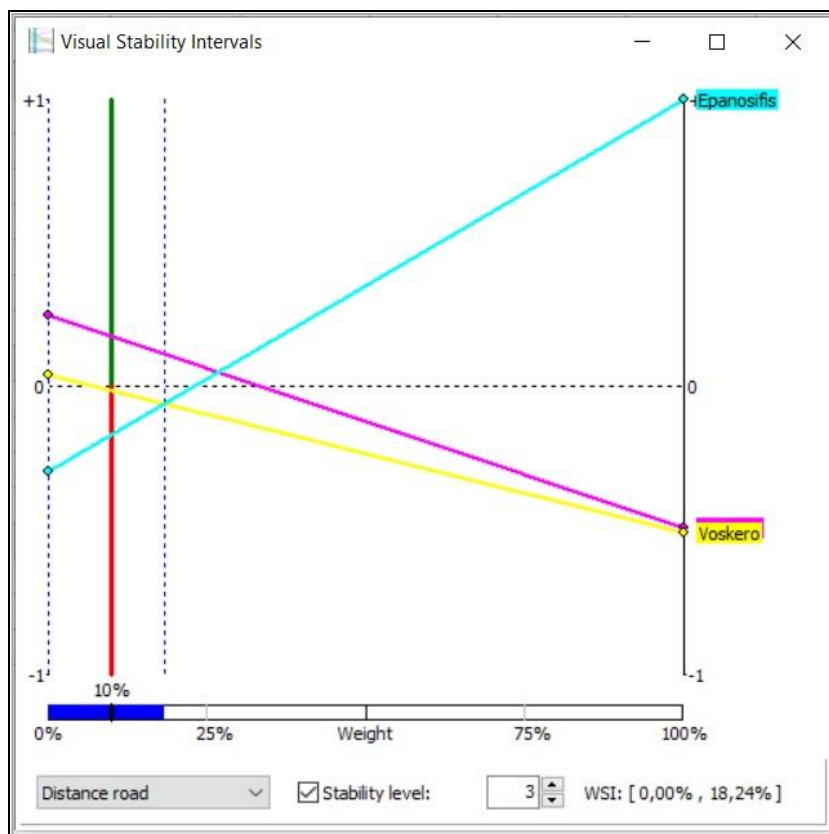
Στο διάγραμμα ευαισθησίας για το κριτήριο της **απόστασης από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας** (Εικόνα 20), η περιοχή **Βοσκερό** εμφανίζει την υψηλότερη επίδοση, ενώ η περιοχή **Βρουχάς** τη χαμηλότερη. Το περιορισμένο εύρος σταθερότητας (WSI: 0,00% – 26,87%) δείχνει ότι η κατάταξη μπορεί να μεταβληθεί για μεγαλύτερες

τιμές βάρους, γεγονός που υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο κριτήριο επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη σχετική αξιολόγηση των εναλλακτικών.



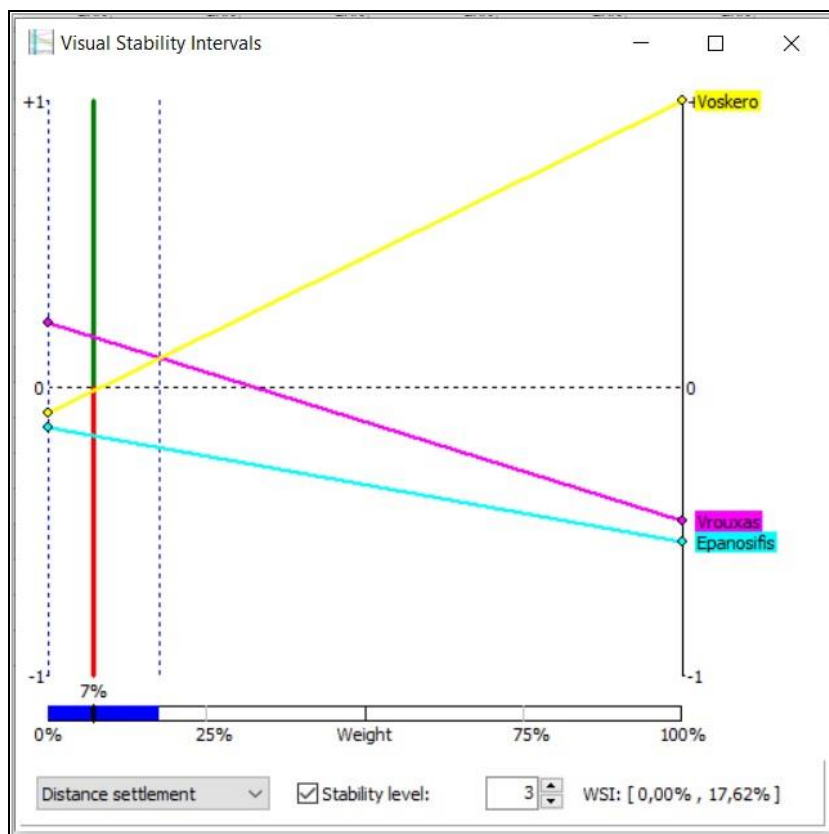
Εικόνα 20: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο απόσταση από δίκτυο ηλεκ. ενέργειας

Στο διάγραμμα ευαισθησίας για το κριτήριο της **απόστασης από το οδικό δίκτυο** (Εικόνα 21), η περιοχή **Επανωσήφης** εμφανίζει την υψηλότερη επίδοση, ενώ η περιοχή **Βοσκερό** τη χαμηλότερη. Το περιορισμένο εύρος σταθερότητας (WSI: 0,00% – 18,24%) δείχνει ότι η κατάταξη επηρεάζεται από μεταβολές του βάρους του κριτηρίου, γεγονός που υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο κριτήριο έχει σημαντική επίδραση στη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών.



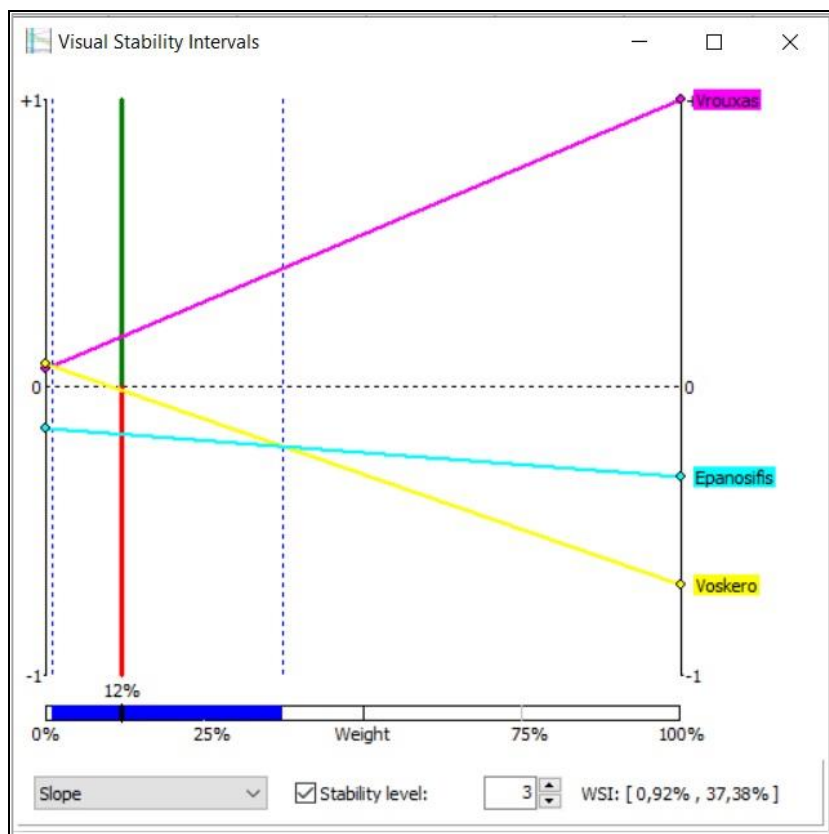
Εικόνα 21: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο απόσταση από οδικό δίκτυο

Στο διάγραμμα ευαισθησίας για το κριτήριο της **απόστασης από τον πλησιέστερο οικισμό** (Εικόνα 22), η περιοχή **Βοσκερό** εμφανίζει την υψηλότερη επίδοση, ενώ οι περιοχές **Βρουχάς** και **Επανωσήφης** παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές, με την περιοχή **Επανωσήφης** να κατατάσσεται τελευταία. Το περιορισμένο εύρος σταθερότητας (WSI: 0,00% – 17,62%) υποδηλώνει ότι η κατάταξη επηρεάζεται από μεταβολές του βάρους του κριτηρίου, γεγονός που αναδεικνύει τη σημαντική επίδρασή του στη συνολική αξιολόγηση.



Εικόνα 22: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο απόσταση από πλησιέστερο οικισμό

Στο διάγραμμα ευαισθησίας για το κριτήριο της **μέσης κλίσης εδάφους** (Εικόνα 23), η περιοχή **Βρουχάς** εμφανίζει την υψηλότερη επίδοση, ενώ η περιοχή **Βοσκερό** τη χαμηλότερη. Η περιοχή **Επανωσήφης** καταλαμβάνει ενδιάμεση θέση. Το σχετικά ευρύτερο εύρος σταθερότητας (WSI: 0,92% – 37,38%) δείχνει ότι η κατάταξη παραμένει σταθερή για ένα σημαντικό εύρος τιμών του βάρους, υποδηλώνοντας μέτρια έως υψηλή επίδραση του κριτηρίου στη συνολική αξιολόγηση.



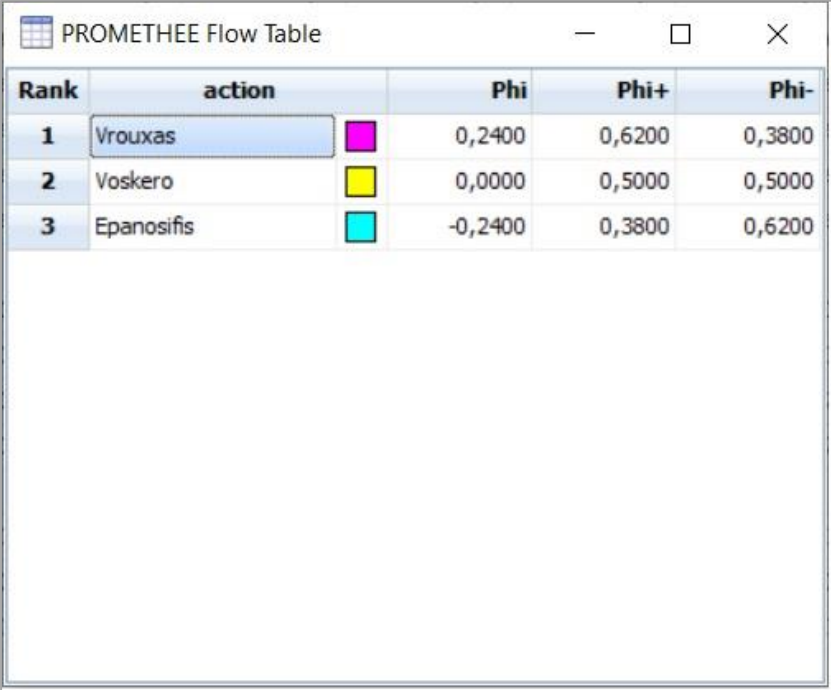
Εικόνα 23: Διάγραμμα ευαισθησίας βαρών για το κριτήριο μέση κλίση εδάφους

6.4.2 Έλεγχος αξιοπιστίας αποτελεσμάτων με τη συνάρτηση Usual

Στο πλαίσιο της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε επιπλέον έλεγχος ευαισθησίας με τη χρήση της συνάρτησης προτίμησης “Usual” της μεθόδου PROMETHEE, με σκοπό την επαλήθευση της σταθερότητας των αποτελεσμάτων. Η συγκεκριμένη συνάρτηση αποτελεί την απλούστερη μορφή συνάρτησης προτίμησης, καθώς δεν χρησιμοποιεί κατώφλια αδιαφορίας ή προτίμησης και βασίζεται αποκλειστικά στο πρόσημο της διαφοράς μεταξύ των τιμών των εναλλακτικών. Πιο συγκεκριμένα, εάν μία εναλλακτική υπερέχει έστω και ελάχιστα μιας άλλης σε ένα κριτήριο, λαμβάνει πλήρη προτίμηση, ενώ σε αντίθετη περίπτωση δεν αποδίδεται καμία προτίμηση.

Η χρήση της συνάρτησης “Usual” επιτρέπει την αξιολόγηση των εναλλακτικών χωρίς την επίδραση παραμέτρων ή υποκειμενικών επιλογών που σχετίζονται με τα κατώφλια, παρέχοντας έτσι μία πιο άμεση σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών, καθώς κάθε θετική διαφορά μεταξύ δύο τιμών οδηγεί άμεσα σε σχέση προτίμησης. Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται κατά πόσο η τελική κατάταξη επηρεάζεται από τη μορφή της συνάρτησης προτίμησης που χρησιμοποιείται στο βασικό σενάριο, ενισχύοντας τη μεθοδολογική αξιοπιστία της ανάλυσης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον πίνακα ροών υπεροχής (PROMETHEE Flow Table, Εικόνα 24), όπου προκύπτει ότι η περιοχή Βρουχάς καταλαμβάνει την πρώτη θέση ($\Phi = 0,2400$), η περιοχή Βοσκερό τη δεύτερη ($\Phi = 0,0000$), ενώ η περιοχή Επανωσήφης την τρίτη ($\Phi = -0,2400$). Η διατήρηση της ίδιας κατάταξης σε σχέση με το βασικό σενάριο δείχνει ότι, για τις συγκεκριμένες εναλλακτικές, τα κριτήρια και τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν, η τελική κατάταξη παρουσιάζει σταθερότητα ως προς τη μεταβολή της συνάρτησης προτίμησης από V-shape σε Usual. Το αποτέλεσμα αυτό ενισχύει την αξιοπιστία της συγκεκριμένης κατάταξης, χωρίς ωστόσο να αποκλείει διαφοροποιήσεις υπό άλλες παραδοχές ή συναρτήσεις προτίμησης.



Rank	action		Phi	Phi+	Phi-
1	Vrouxas		0,2400	0,6200	0,3800
2	Voskero		0,0000	0,5000	0,5000
3	Epanosifis		-0,2400	0,3800	0,6200

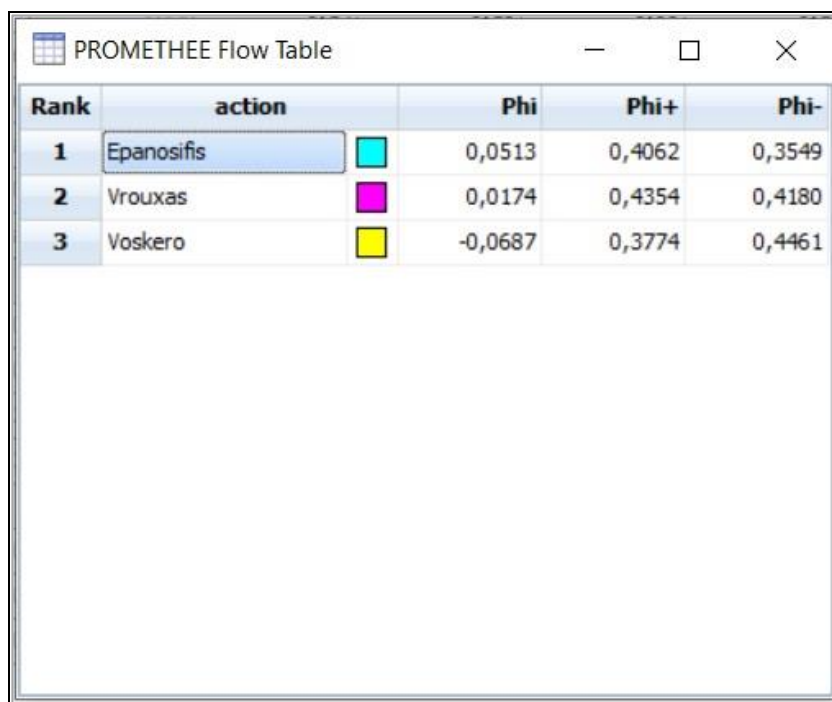
Εικόνα 24: PROMETHEE Flow Table με χρήση της συνάρτησης προτίμησης “Usual”

6.4.3 Ανάλυση εναλλακτικής επίλυσης βάσει Manolan Kandy et al. (2024)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε εναλλακτική επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης ανεμογεννητριών, βασισμένη στη μεθοδολογική προσέγγιση των Manolan Kandy et al. (2024), με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών προτεραιοτήτων στη διαδικασία λήψης απόφασης. Σε αντίθεση με το βασικό σενάριο, η προσέγγιση αυτή δίνει αυξημένη έμφαση σε περιβαλλοντικά, κοινωνικά και πολιτιστικά κριτήρια, όπως η απόσταση από οικισμούς, τουριστικές περιοχές, αρχαιολογικούς χώρους και προστατευόμενες εκτάσεις. Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται κατά πόσο η τελική κατάταξη των εναλλακτικών μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η φιλοσοφία αξιολόγησης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποτυπώνονται στον πίνακα ροών υπεροχής (PROMETHEE Flow Table, Εικόνα 25), από τον οποίο προκύπτει ότι η περιοχή **Επανωσήφης** καταλαμβάνει την πρώτη θέση ($\Phi = 0,0513$), ενώ ακολουθούν οι περιοχές **Βρουχάς** ($\Phi = 0,0174$) και **Βοσκερό** ($\Phi = -0,0687$). Η κατάταξη αυτή

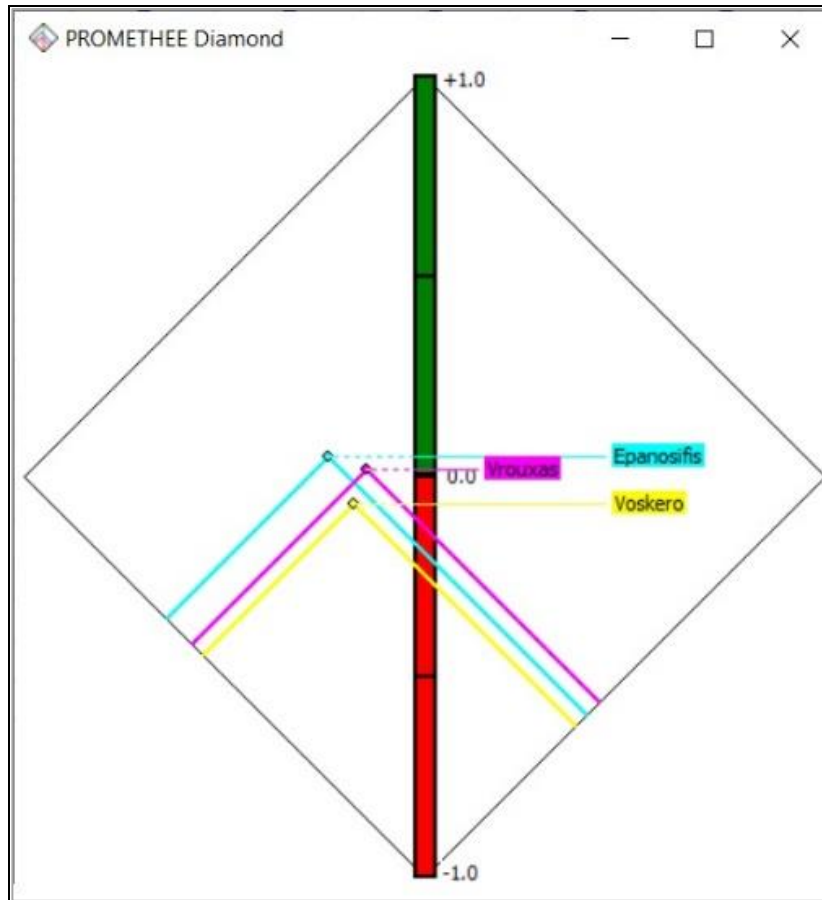
διαφοροποιείται σε σχέση με το βασικό σενάριο, γεγονός που καταδεικνύει ότι η επιλογή των βαρών και η έμφαση σε διαφορετικές κατηγορίες κριτηρίων επηρεάζει ουσιαστικά το τελικό αποτέλεσμα. Ωστόσο, η σχετικά μικρή διαφορά στις τιμές της καθαρής ροής (Φ) υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει έντονη υπεροχή, αλλά μία οριακή διαφοροποίηση μεταξύ των εναλλακτικών.



Rank	action		Phi	Phi+	Phi-
1	Epanosifs		0,0513	0,4062	0,3549
2	Vrouxas		0,0174	0,4354	0,4180
3	Voskero		-0,0687	0,3774	0,4461

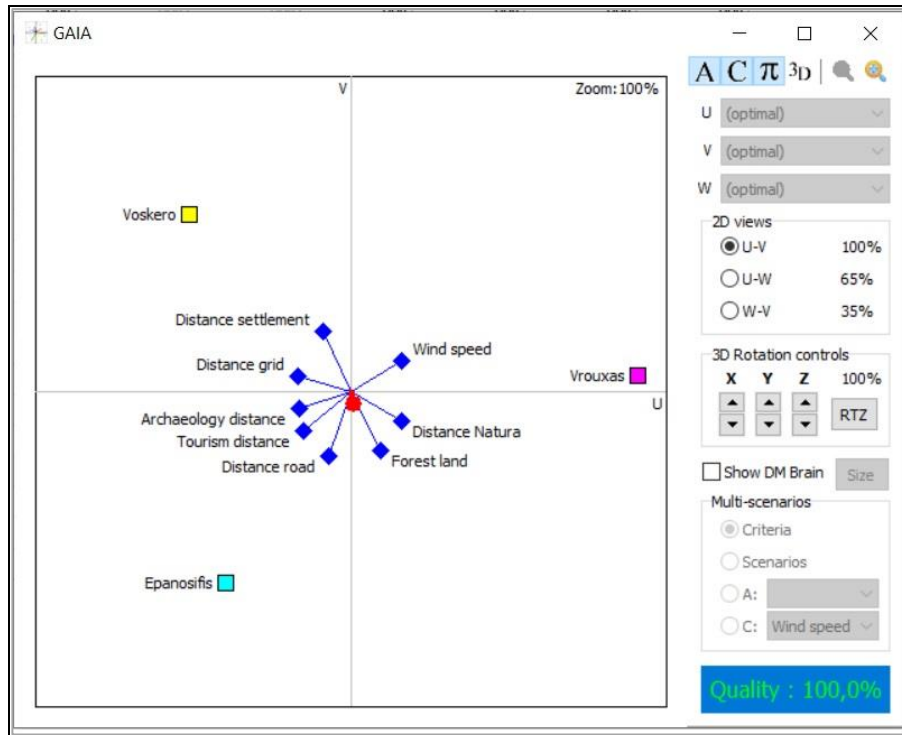
Εικόνα 25: PROMETHEE Flow Table της εναλλακτικής επίλυσης

Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα PROMETHEE Diamond (Εικόνα 26), όπου η περιοχή **Επανωσήφης** εμφανίζεται με ελαφρώς υψηλότερη καθαρή ροή σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές, χωρίς όμως να παρουσιάζεται σαφής απόσταση από αυτές. Οι περιοχές **Βρουχάς** και **Βοσκερό** κινούνται σε παρόμοια επίπεδα, γεγονός που καταδεικνύει συγκρίσιμη επίδοση υπό το συγκεκριμένο σενάριο. Το διάγραμμα επιβεβαιώνει ότι η διαφοροποίηση της κατάταξης είναι αποτέλεσμα ισορροπίας μεταξύ αντικρουόμενων κριτηρίων και όχι ισχυρής υπεροχής μιας εναλλακτικής.



Εικόνα 26: PROMETHEE Diamond της εναλλακτικής επίλυσης

Περαιτέρω ερμηνεία παρέχεται από το διάγραμμα PROMETHEE GAIA (Εικόνα 27), στο οποίο αποτυπώνονται οι σχέσεις μεταξύ των εναλλακτικών θέσεων και των κριτηρίων αξιολόγησης. Παρατηρείται ότι η περιοχή **Επανωσήφης** κατευθύνεται προς την πλευρά των περιβαλλοντικών και κοινωνικών κριτηρίων, γεγονός που εξηγεί την ανάδειξή της ως καταλληλότερης επιλογής στο παρόν σενάριο. Αντίθετα, η περιοχή **Βρονχάς** ευθυγραμμίζεται περισσότερο με τεχνικά κριτήρια, όπως το αιολικό δυναμικό, τα οποία όμως έχουν μικρότερη βαρύτητα στην παρούσα προσέγγιση.



Εικόνα 27: Ανάλυση PROMETHEE GAIA της εναλλακτικής επίλυσης

Η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE ανέδειξε διαφοροποιήσεις στην κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων, ανάλογα με τα βάρη των κριτηρίων και τη μορφή της συνάρτησης προτίμησης που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε σενάριο. Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των επιμέρους κριτηρίων στη διαδικασία λήψης απόφασης και αναδεικνύει τον ρόλο των τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων στη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων. Στο επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται αναλυτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εξετάζεται η συμβολή των παραγόντων που διαμόρφωσαν την τελική κατάταξη των περιοχών.

7. Αποτελέσματα

7.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρέχει μια σαφή εικόνα σχετικά με τη συγκριτική καταλληλότητα των εναλλακτικών περιοχών για χωροθέτηση ανεμογεννητριών, χωρίς να προκύπτει μία απόλυτα κυρίαρχη εναλλακτική θέση. Στο βασικό σενάριο, όπου τα κριτήρια σταθμίστηκαν με έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά, η περιοχή Βρουχάς προέκυψε ως η πλέον κατάλληλη επιλογή. Η υπεροχή αυτή σχετίζεται κυρίως με το υψηλό αιολικό δυναμικό της περιοχής, τη χαμηλότερη μέση κλίση του εδάφους και την ευνοϊκή επίδοσή της ως προς περιβαλλοντικά κριτήρια, όπως η απόσταση από περιοχές Natura 2000, στοιχεία που αντισταθμίζουν τη δυσμενέστερη θέση της ως προς την εγγύτητα σε βασικές υποδομές.

Αντίθετα, η περιοχή Επανωσήφης δεν παρουσίασε αντίστοιχη επίδοση στο βασικό σενάριο, γεγονός που οφείλεται σε χαμηλότερες τιμές σε ορισμένα από τα τεχνικά κριτήρια. Ωστόσο, η εικόνα αυτή διαφοροποιείται όταν αλλάζει η προσέγγιση αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, στην εναλλακτική επίλυση που βασίστηκε στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), όπου δίνεται μεγαλύτερη έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, η περιοχή Επανωσήφης κατατάσσεται πρώτη.

Η διαφοροποίηση της κατάταξης μεταξύ των σεναρίων συνδέεται με τον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο τα επιμέρους κριτήρια επηρεάζουν κάθε περιοχή. Περιοχές που εμφανίζουν υψηλή επίδοση σε τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως το αιολικό δυναμικό ή η εγγύτητα σε υποδομές, ενδέχεται να υστερούν σε περιβαλλοντικούς ή κοινωνικούς δείκτες και το αντίστροφο. Παράλληλα, αρκετά κριτήρια εκφράζουν αντικρουόμενες απαιτήσεις, γεγονός που αναδεικνύει τη σύνθετη φύση της διαδικασίας χωροθέτησης.

Συνεπώς, η τελική κατάταξη προκύπτει από τη σύνθεση όλων των παραπάνω παραγόντων και αντανακλά την ισορροπία μεταξύ τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η πολυπλοκότητα αυτή αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της πολυκριτηριακής ανάλυσης και εξηγεί γιατί η κατάταξη των εναλλακτικών μπορεί να διαφοροποιείται μεταξύ των σεναρίων.

Όταν η ανάλυση δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην ενεργειακή απόδοση και στην τεχνική υλοποίηση του έργου, ευνοούνται περιοχές που συνδυάζουν υψηλό αιολικό δυναμικό με καλή πρόσβαση σε υποδομές. Αντίθετα, όταν λαμβάνονται περισσότερο υπόψη περιβαλλοντικοί περιορισμοί και κοινωνικές επιπτώσεις, προκύπτουν διαφορετικές προτεραιότητες και, κατ' επέκταση, διαφορετική κατάταξη.

Ένα ακόμη στοιχείο που αξίζει να επισημανθεί είναι ότι οι διαφορές στις τιμές της καθαρής ροής υπεροχής (Φ) μεταξύ των εναλλακτικών περιοχών είναι σχετικά μικρές. Αυτό σημαίνει ότι καμία περιοχή δεν υπερέχει με μεγάλη διαφορά από τις υπόλοιπες, αλλά όλες παρουσιάζουν συγκρίσιμη συνολική επίδοση. Με άλλα λόγια, η τελική κατάταξη δεν παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις και μπορεί να επηρεαστεί από μικρές αλλαγές στα βάρη των κριτηρίων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η καταλληλότητα μιας περιοχής για εγκατάσταση ανεμογεννητριών δεν εξαρτάται από έναν μόνο παράγοντα, αλλά από τον συνδυασμό τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η πολυκριτηριακή προσέγγιση επέτρεψε την ταυτόχρονη αξιολόγηση των παραγόντων αυτών και ανέδειξε τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικές προτεραιότητες μπορούν να επηρεάσουν την τελική κατάταξη των εναλλακτικών περιοχών.

7.2 Επίδραση του αναγλύφου στη συγκριτική κατάταξη

Η επίδραση του αναγλύφου στη συγκριτική κατάταξη των εναλλακτικών περιοχών δεν περιορίζεται μόνο στο κριτήριο της μέσης κλίσης του εδάφους, αλλά σχετίζεται συνολικά με τη γεωμορφολογία της κάθε περιοχής. Συγκεκριμένα, το αν μια περιοχή είναι ορεινή, ημιορεινή ή παραθαλάσσια επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τόσο την τεχνική καταλληλότητα όσο και την περιβαλλοντική και κοινωνική της αξιολόγηση.

Οι ορεινές περιοχές, για παράδειγμα, εμφανίζουν συνήθως υψηλότερο αιολικό δυναμικό, γεγονός που τις καθιστά ελκυστικές από ενεργειακή άποψη. Ωστόσο, το έντονο ανάγλυφο συνεπάγεται αυξημένες δυσκολίες ως προς την εγκατάσταση και τη συντήρηση των ανεμογεννητριών, καθώς και μεγαλύτερο κόστος κατασκευής λόγω

περιορισμένης προσβασιμότητας. Παράλληλα, οι περιοχές αυτές συχνά συνδέονται με μεγαλύτερη περιβαλλοντική ευαισθησία, καθώς μπορεί να περιλαμβάνουν δασικές εκτάσεις ή προστατευόμενες περιοχές.

Αντίθετα, οι περιοχές με ήπιο ανάγλυφο χαρακτηρίζονται από καλύτερη προσβασιμότητα, γεγονός που διευκολύνει την υλοποίηση των έργων. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζουν χαμηλότερο αιολικό δυναμικό, ενώ συχνά βρίσκονται σε εγγύτητα με οικισμούς ή γεωργικές δραστηριότητες, παράγοντες που ενδέχεται να δημιουργούν κοινωνικούς περιορισμούς.

Οι παραθαλάσσιες περιοχές χαρακτηρίζονται από έναν συνδυασμό ευνοϊκών τεχνικών συνθηκών, καθώς μπορούν να διαθέτουν ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό και καλή προσβασιμότητα. Ωστόσο, συχνά συνδέονται με αυξημένη τουριστική δραστηριότητα, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την καταλληλότητά τους από κοινωνική και αισθητική άποψη.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προκύπτει ότι το ανάγλυφο επηρεάζει τόσο άμεσα όσο και έμμεσα τη συνολική κατάταξη, μέσω της επίδρασής του σε περισσότερα από ένα κριτήρια. Δηλαδή, δεν λειτουργεί ως μεμονωμένος παράγοντας, αλλά ως στοιχείο που διαμορφώνει ταυτόχρονα το αιολικό δυναμικό, την προσβασιμότητα, τη σχέση με τις υποδομές και την περιβαλλοντική ευαισθησία της κάθε περιοχής.

Συνεπώς, η επίδραση του αναγλύφου στη συγκριτική αξιολόγηση είναι πολυδιάστατη και εξαρτάται από τον συνδυασμό των επιμέρους χαρακτηριστικών κάθε περιοχής. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγησή του δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε έναν μόνο δείκτη, όπως η κλίση του εδάφους, αλλά απαιτεί μια πιο συνολική προσέγγιση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Στο πλαίσιο αυτό, πέρα από τη γενική μορφολογία του εδάφους, ιδιαίτερη σημασία έχει και η μέση κλίση, η οποία εξετάζεται ως επιμέρους κριτήριο στην ανάλυση.

Η μέση κλίση του εδάφους αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει άμεσα την τεχνική υλοποίηση των έργων. Περιοχές με μεγάλες κλίσεις δυσχεραίνουν την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, αυξάνουν το κόστος κατασκευής και περιορίζουν την προσβασιμότητα, ιδιαίτερα κατά τη φάση της κατασκευής.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι η επίδραση της κλίσης είναι σημαντική, χωρίς όμως να λειτουργεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα κριτήρια. Σε περιπτώσεις όπου το αιολικό δυναμικό είναι υψηλό, η αρνητική επίδραση της έντονης κλίσης μπορεί να αντισταθμιστεί σε κάποιο βαθμό. Αντίθετα, σε σενάρια όπου δίνεται μεγαλύτερη έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, η κλίση αποκτά μεγαλύτερη βαρύτητα, καθώς συνδέεται με την ένταση της παρέμβασης στο τοπίο και την ευκολία ενσωμάτωσης των έργων στο περιβάλλον.

Συνολικά, η μέση κλίση του εδάφους αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα, ο οποίος επηρεάζει ουσιαστικά τη συγκριτική κατάταξη των εναλλακτικών περιοχών, σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα κριτήρια. Η επίδρασή της δεν περιορίζεται μόνο στο τεχνικό σκέλος της υλοποίησης, αλλά συνδέεται και με το αιολικό δυναμικό, την προσβασιμότητα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Με τον τρόπο αυτό, αναδεικνύεται ο πολυδιάστατος ρόλος της στη συνολική αξιολόγηση και η σημασία της στο πλαίσιο της ανάλυσης.

7.3 Μεθοδολογικοί περιορισμοί

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ακολουθεί μια συστηματική και τεκμηριωμένη προσέγγιση. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που είναι σημαντικό να επισημανθούν. Αρχικά, η επιλογή των κριτηρίων και η στάθμισή τους βασίζεται σε βιβλιογραφικές αναφορές που σχετίζονται με τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων και την εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων. Η τελική διαμόρφωση των βαρών περιλαμβάνει έναν βαθμό υποκειμενικότητας ως προς τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου. Στο πλαίσιο της εναλλακτικής επίλυσης, η στάθμιση των κριτηρίων βασίστηκε ειδικότερα στη μελέτη των Manolan Kandy et al. (2024), η οποία δίνει μεγαλύτερη έμφαση σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια.

Επιπλέον, η ανάλυση βασίζεται σε χωρικά δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές πηγές. Η ακρίβεια, η χωρική ανάλυση και η επικαιρότητα των δεδομένων αυτών επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Τυχόν σφάλματα ή γενικεύσεις στα δεδομένα μπορεί να μεταφερθούν και στην τελική κατάταξη των

εναλλακτικών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι διαφορές μεταξύ των περιοχών είναι μικρές.

Εκτός από τα χωρικά δεδομένα που προέκυψαν από την επεξεργασία στο περιβάλλον GIS, για τον προσδιορισμό των τιμών των κριτηρίων αξιοποιήθηκαν δεδομένα από επίσημες πηγές και διαθέσιμες βάσεις δεδομένων. Οι πηγές αυτές έχουν ήδη παρουσιαστεί αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας. Παρόλα αυτά, η αξιοπιστία και η ακρίβεια των δεδομένων αυτών επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Ένας ακόμη περιορισμός σχετίζεται με την ίδια τη μέθοδο PROMETHEE. Η επιλογή της συνάρτησης προτίμησης και των παραμέτρων της επηρεάζει τη διαδικασία σύγκρισης των εναλλακτικών. Παρόλο που στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι ευαισθησίας και εναλλακτικές επιλύσεις (όπως η χρήση της συνάρτησης “Usual”), οι επιλογές αυτές αποτελούν μέρος της μεθοδολογίας και ενδέχεται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα.

Παράλληλα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση θεωρούνται σε έναν βαθμό ανεξάρτητα μεταξύ τους, ενώ στην πράξη ενδέχεται να εμφανίζουν συσχετίσεις. Για παράδειγμα, το ανάγλυφο μιας περιοχής μπορεί να επηρεάζει τόσο το αιολικό δυναμικό όσο και την προσβασιμότητα ή την περιβαλλοντική της ευαισθησία. Η αλληλεπίδραση αυτή δεν αποτυπώνεται πλήρως στη μεθοδολογία και αποτελεί έναν επιπλέον περιορισμό.

Επιπλέον, η ανάλυση πραγματοποιείται για συγκεκριμένο αριθμό εναλλακτικών περιοχών και βασίζεται σε συγκεκριμένη κλίμακα χωρικής προσέγγισης. Ενδεχόμενη διαφοροποίηση της περιοχής μελέτης ή εξέταση μεγαλύτερου αριθμού εναλλακτικών θα μπορούσε να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα.

Πέρα από τα παραπάνω, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η πολυκριτηριακή ανάλυση αποτελεί μια απλοποιημένη αναπαράσταση της πραγματικότητας. Η μετατροπή σύνθετων φαινομένων σε μετρήσιμα κριτήρια διευκολύνει τη σύγκριση των

εναλλακτικών, ωστόσο δεν μπορεί να αποτυπώσει πλήρως όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη διαδικασία χωροθέτησης.

Τέλος, η ανάλυση έχει στατικό χαρακτήρα, καθώς βασίζεται σε δεδομένα που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Στην πράξη, παράγοντες όπως το αιολικό δυναμικό ή οι υποδομές ενδέχεται να μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη μακροχρόνια καταλληλότητα των περιοχών.

Συνολικά, πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν αποτελούν απόλυτη πρόταση χωροθέτησης, αλλά μια συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών περιοχών. Η τελική απόφαση σε πραγματικές συνθήκες θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και άλλους παράγοντες, όπως το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, οικονομικά δεδομένα και κοινωνική αποδοχή.

Η αποτίμηση των αποτελεσμάτων και των περιορισμών της μεθοδολογίας συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της εφαρμογής πολυκριτηριακών μεθόδων στη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα που προέκυψαν από την ανάλυση.

8. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

8.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών περιοχών για τη χωροθέτηση ανεμογεννητριών, μέσω της εφαρμογής πολυκριτηριακής ανάλυσης με τη μέθοδο PROMETHEE. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε βασίστηκε στον συνδυασμό χωρικών δεδομένων και κατάλληλα επιλεγμένων κριτηρίων, τα οποία αποτυπώνουν τεχνικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές παραμέτρους.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι η κατάταξη των εναλλακτικών περιοχών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη στάθμιση των κριτηρίων. Στο βασικό σενάριο, όπου δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά, η περιοχή Βρουχάς αναδείχθηκε ως η πλέον κατάλληλη επιλογή, κυρίως λόγω του υψηλού αιολικού δυναμικού, της χαμηλότερης μέσης κλίσης του εδάφους και της ευνοϊκής επίδοσής της ως προς ορισμένα περιβαλλοντικά κριτήρια, παρά τη μεγαλύτερη απόστασή της από βασικές υποδομές. Αντίθετα, στην εναλλακτική επίλυση, όπου ενισχύθηκαν τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, η περιοχή Επανωσήφης κατέλαβε την πρώτη θέση, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της διαφορετικής προσέγγισης αξιολόγησης.

Η διαφοροποίηση αυτή επιβεβαιώνει ότι η διαδικασία χωροθέτησης ανεμογεννητριών δεν οδηγεί απαραίτητα σε μία μοναδική βέλτιστη λύση, αλλά αποτελεί αποτέλεσμα ισορροπίας μεταξύ αντικρουόμενων κριτηρίων. Παράλληλα, η σχετικά μικρή διαφορά στις τιμές της καθαρής ροής υπεροχής (Φ) μεταξύ των εναλλακτικών περιοχών δείχνει ότι οι επιλογές είναι συγκρίσιμες και ότι η τελική κατάταξη μπορεί να επηρεαστεί από μικρές μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων.

Στο ίδιο πλαίσιο, από την ανάλυση φάνηκε ότι το ανάγλυφο, και ειδικότερα η κλίση του εδάφους, δεν λειτουργεί μόνο ως ένα μεμονωμένο κριτήριο, αλλά επηρεάζει και άλλους παράγοντες, όπως το αιολικό δυναμικό και την προσβασιμότητα. Αυτό δείχνει ότι το πρόβλημα είναι πιο σύνθετο και απαιτεί συνολική αντιμετώπιση.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα αφορά την αλληλεπίδραση μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης. Η ανάλυση έδειξε ότι τα κριτήρια δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις εκφράζουν διαφορετικές ή και αντικρουόμενες απαιτήσεις.

Για παράδειγμα, περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό ενδέχεται να παρουσιάζουν περιορισμούς ως προς την περιβαλλοντική προστασία ή την κοινωνική αποδοχή. Η αλληλεπίδραση αυτή αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της πολυκριτηριακής ανάλυσης και επηρεάζει ουσιαστικά την τελική κατάταξη των εναλλακτικών.

Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία έχει και η συμβολή των γεωχωρικών δεδομένων στην ανάλυση. Η χρήση GIS επέτρεψε την αποτύπωση και ποσοτικοποίηση των κριτηρίων με τρόπο συστηματικό και συγκρίσιμο, διευκολύνοντας τη διαδικασία αξιολόγησης. Η χρήση των δεδομένων αυτών συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας για την αξιολόγηση των εναλλακτικών περιοχών.

Επιπλέον, η εφαρμογή διαφορετικών σεναρίων και η εξέταση της ευαισθησίας της ανάλυσης συνέβαλαν στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του μοντέλου. Η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα βάρη των κριτηρίων αποτελεί αναμενόμενο χαρακτηριστικό της μεθόδου και αναδεικνύει τη δυνατότητα προσαρμογής της σε διαφορετικές προτεραιότητες σχεδιασμού. Συνολικά, η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE σε συνδυασμό με τη χρήση γεωχωρικών δεδομένων αποδείχθηκε ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη στήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δεν αποτελούν οριστική πρόταση χωροθέτησης, αλλά ένα τεκμηριωμένο πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης των εναλλακτικών περιοχών, αναδεικνύοντας παράλληλα περιθώρια περαιτέρω διερεύνησης και βελτίωσης της μεθοδολογικής προσέγγισης. Με βάση τα ευρήματα της παρούσας εργασίας, διαμορφώνονται ορισμένες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, οι οποίες μπορούν να συμβάλουν στην ενίσχυση της ανάλυσης και στη διεύρυνση της εφαρμογής της.

8.2 Μελλοντική έρευνα και προτάσεις

Με βάση τα αποτελέσματα και τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, προκύπτουν ορισμένες κατευθύνσεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας και περαιτέρω ανάπτυξης της ανάλυσης. Αρχικά, θα μπορούσε να εξεταστεί η ενσωμάτωση επιπλέον κριτηρίων στην αξιολόγηση, με στόχο την πιο ολοκληρωμένη αποτύπωση του προβλήματος. Ενδεικτικά, η προσθήκη οικονομικών παραμέτρων, όπως το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των ανεμογεννητριών, ή πιο εξειδικευμένων περιβαλλοντικών δεικτών, θα μπορούσε να εμπλουτίσει την ανάλυση και να οδηγήσει σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η εφαρμογή και άλλων μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπως οι AHP, ELECTRE ή TOPSIS, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της μεθόδου PROMETHEE. Η σύγκριση αυτή θα μπορούσε να αναδείξει τον βαθμό στον οποίο η επιλογή της μεθοδολογίας επηρεάζει την τελική κατάταξη των εναλλακτικών περιοχών.

Μία ακόμη ενδιαφέρουσα κατεύθυνση είναι η βελτίωση της ανάλυσης ευαισθησίας, μέσα από τη δοκιμή περισσότερων σεναρίων στάθμισης ή τη συμμετοχή διαφορετικών ομάδων ενδιαφερομένων στη διαδικασία καθορισμού των βαρών των κριτηρίων. Με τον τρόπο αυτό, τα αποτελέσματα μπορούν να ανταποκρίνονται καλύτερα στις πραγματικές ανάγκες και προτεραιότητες της κοινωνίας και των φορέων λήψης αποφάσεων.

Παράλληλα, η αξιοποίηση πιο αναλυτικών και πρόσφατων χωρικών δεδομένων θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια της ανάλυσης. Η χρήση δεδομένων υψηλότερης ανάλυσης ή η ενσωμάτωση δυναμικών δεδομένων θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μεγαλύτερη γεωγραφική κλίμακα ή σε διαφορετικές περιοχές θα μπορούσε να βοηθήσει στην κατανόηση του κατά πόσο τα αποτελέσματα μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλες περιπτώσεις. Η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών περιοχών με διαφορετικά γεωμορφολογικά και κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά θα μπορούσε να αναδείξει περαιτέρω τη δυναμική της μεθόδου.

Μια ακόμη ενδιαφέρουσα προοπτική είναι η ενσωμάτωση χρονικής διάστασης στην ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη πιθανές μεταβολές των κριτηρίων με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα, αλλαγές στο αιολικό δυναμικό ή στην ανάπτυξη υποδομών θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη μακροχρόνια καταλληλότητα μιας περιοχής.

Επιπλέον, θα μπορούσε να διερευνηθεί η ανάπτυξη πιο αυτοματοποιημένων διαδικασιών ανάλυσης, μέσω της σύνδεσης εργαλείων GIS με μοντέλα πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να διευκολύνει την αναπαραγωγή της ανάλυσης, να μειώσει τον χρόνο επεξεργασίας και να επιτρέψει την εφαρμογή της σε μεγαλύτερο αριθμό περιοχών με πιο συστηματικό τρόπο. Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας θα μπορούσε να συμβάλει στην ευκολότερη ενημέρωση των αποτελεσμάτων σε περίπτωση αλλαγών στα δεδομένα ή στα κριτήρια.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε πραγματικές διαδικασίες σχεδιασμού, με τη συμμετοχή φορέων και ειδικών του τομέα, ώστε να αξιολογηθεί η πρακτική της αξία στη λήψη αποφάσεων. Μέσα από μια τέτοια εφαρμογή, θα μπορούσε να εξεταστεί κατά πόσο τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανταποκρίνονται στις πραγματικές ανάγκες και περιορισμούς, καθώς και να αναδειχθούν πιθανές βελτιώσεις στη μεθοδολογία. Η συνεργασία με διαφορετικούς εμπλεκόμενους φορείς θα μπορούσε να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση των προτεραιοτήτων και στην ενίσχυση της αποδοχής των προτεινόμενων λύσεων.

Συνολικά, οι παραπάνω κατευθύνσεις δείχνουν ότι η πολυκριτηριακή ανάλυση αποτελεί ένα δυναμικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να εξελιχθεί και να προσαρμοστεί ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Η ευελιξία της μεθόδου, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ενσωμάτωσης διαφορετικών τύπων δεδομένων και κριτηρίων, την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη για την υποστήριξη σύνθετων αποφάσεων στη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων.

Η περαιτέρω ανάπτυξη και εφαρμογή της μπορεί να συμβάλει σε πιο ολοκληρωμένες και τεκμηριωμένες διαδικασίες αξιολόγησης, ενισχύοντας τη σύνδεση μεταξύ τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων στο πλαίσιο του χωρικού σχεδιασμού.

Βιβλιογραφία

- Abdullah, A. G., Utami, H. P., Gunawan, B., Ratmono, B. M., & Pasaribu, N. T. (2025). Multi-criteria decision-making for wind power project feasibility: Trends, techniques, and future directions. *Cleaner Engineering and Technology*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100987>
- Albraheem, L., & AlAwlaqi, L. (2023). Geospatial analysis of wind energy plant in Saudi Arabia using a GIS-AHP technique. *Energy Reports*, 9, 5878–5898. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.032>
- Amsharuk, A., & Łaska, G. (2024). Site selection of wind farms in Poland: Combining theory with reality. *Energies*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/en17112635>
- Asadi, M., & Pourhossein, K. (2021). Wind farm site selection considering turbulence. *Energy*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121480>
- Badi, I., Pamučar, D., Stević, Ž., & Muhammad, L. J. (2023). Wind farm site selection using BWM-AHP-MARCOS method: A case study of Libya. *Scientific African*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01511>
- Bertsiou, M. M., Theochari, A. P., Gergatsoulis, D., Gerakianakis, M., & Baltas, E. (2025). Optimal site selection for wind and solar parks in Karpathos Island using a GIS-MCDM model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi14030125>
- Dimitriou, I. C., Sarmas, E., Trachanas, G. P., Marinakis, V., & Doukas, H. (2025). Multi-criteria GIS-based offshore wind farm site selection: Case study in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114962>

- Döker, M. F., Özдорuk, E., Kirlangıçoğlu, C., & Minaei, M. (2025). Wind power plant site selection using fuzzy AHP and weighted fuzzy overlay. *Wind Energy*, 28(3). <https://doi.org/10.1002/we.70001>
- Imam, A. A., Abusorrah, A., & Marzband, M. (2024). Potentials and opportunities of solar PV and wind energy sources in Saudi Arabia: Land suitability, techno-socio-economic feasibility, and future variability. *Results in Engineering*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101785>
- Josimović, B., Srnić, D., Manić, B., & Knežević, I. (2023). Multi-criteria evaluation of spatial aspects in the selection of wind farm locations: Integrating the GIS and PROMETHEE methods. *Applied Sciences*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/app13095332>
- Karamountzou, S., & Vagiona, D. G. (2023). Suitability and sustainability assessment of existing onshore wind farms in Greece. *Sustainability*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032095>
- Latinopoulos, D., & Kechagia, K. (2015). A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection: A regional scale application in Greece. *Renewable Energy*, 78, 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.041>
- Manolan Kandy, D., Mörtberg, U., Wretling, V., Kuhlefeldt, A., Byström, G., Polatidis, H., Barney, A., & Balfors, B. (2024). Spatial multicriteria framework for sustainable wind-farm planning—Accounting for conflicts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113856>
- Moradi, S., Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Rosso, D. (2020). Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100478>

- Placide, G., & Lollchund, M. R. (2024). Wind farm site selection using GIS-based mathematical modeling and fuzzy logic tools: A case study of Burundi. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1353388>
- Tsoutsos, T., Tsitoura, I., Kokologos, D., & Kalaitzakis, K. (2015). Sustainable siting process in large wind farms: Case study in Crete. *Renewable Energy*, 75, 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.020>
- Vagiona, D. G., & Kamilakis, M. (2018). Sustainable site selection for offshore wind farms in the South Aegean-Greece. *Sustainability*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030749>
- Moltames, R., Naghavi, M. S., Silakhori, M., Noorollahi, Y., Yousefi, H., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Azizimehr, B. (2022). Multi-criteria decision methods for selecting a wind farm site using a geographic information system (GIS). *Sustainability*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142214742>
- Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. *Renewable Energy*, 157, 377–403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.137>
- Shao, M., Mao, Z., Sun, J., Guan, X., Shao, Z., & Tang, T. (2025). Multi-scale offshore wind farm site selection decision framework based on GIS, MCDM and meta-heuristic algorithm. *Ocean Engineering*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119921>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2011). *Renewable energy sources and climate change mitigation*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>
- Bilendo, F., Meyer, A., Badihi, H., Lu, N., Cambron, P., & Jiang, B. (2023). Applications and modeling techniques of wind turbine power curve for wind farms—A review. *Energies*, 16(1), 180. <https://doi.org/10.3390/en16010180>
- Dinçer, A. E., Demir, A., & Yılmaz, K. (2023). Enhancing wind turbine site selection through a novel wake penalty criterion. *Energy*, 283, 129096. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129096>

- International Renewable Energy Agency. (2024). *Geopolitics of the energy transition: Energy security*. <https://www.irena.org/Publications/2024/Apr/Geopolitics-of-the-energy-transition-Energy-security>
- International Energy Agency. (2023). *Managing seasonal and interannual variability of renewables*. <https://www.iea.org/reports/managing-seasonal-and-interannual-variability-of-renewables>
- U.S. Department of Energy. (n.d.). *Land-based wind energy economic development guide*. WINDEXchange. <https://www.energy.gov/cmei/systems/windexchange/land-based-economic-development-guide>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2026). Ειδικό Χωροταξικό Πλαίσιο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΥΠΕΝ/ΔΝΕΠ/89998/3072). *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*, ΦΕΚ Δ' 694/19.08.2026.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων. (2008). *Έγκριση Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού* (Απόφαση 49828/12.11.2008). *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*, ΦΕΚ Β' 2464/03.12.2008.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2011). Νόμος 4014/2011: *Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις αρμοδιότητας Υπουργείου Περιβάλλοντος*. *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*, ΦΕΚ Α' 209/21.09.2011.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2020). Νόμος 4685/2020: *Εκσυγχρονισμός περιβαλλοντικής νομοθεσίας, ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία των Οδηγιών 2018/844 και 2019/692 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις*. *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*, ΦΕΚ Α' 92/07.05.2020.
- 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*. *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*, ΦΕΚ Α' 129/04.07.2022.

Ιστοσελίδες:

<https://globalwindatlas.info/>

<https://geoportal.apdkritis.gov.gr/gis/home/index.html>

<https://eletaen.gr/>

<https://geo.rae.gr/>

<https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/6fc8ad2d-195d-40f4-bdec-576e7d1268e4>

<https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html>

<https://maps.gov.gr/>

<https://gis.ktimanet.gr/gis/forestfinal>

<https://www.arxaiologikoktimatologio.gov.gr/>

<https://www.windustry.org/>