



Σχολή Θετικών Επιστημών
«Διαχείριση Τεχνικών Έργων»

Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία
«Αξιολόγηση και Επιλογή Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών
με τη Χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης»

«Ανδρέας Γκουτζιομήτρος»

Επιβλέπων καθηγητής: «Γεώργιος Τσιάτας»

Πάτρα, «Ιούλιος» «2026»

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») 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 συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Αξιολόγηση και Επιλογή Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών
με τη Χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης»

«Ανδρέας Γκουτζιομήτρος»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

«Γεώργιος Τσιάτας»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

«Ευαγγελινός Κωνσταντίνος»

Πάτρα, «Ιούλιος» «2026»

«Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στους διδάσκοντες του προγράμματος που συνέβαλαν στην απόκτηση δεξιοτήτων σε διάφορα πεδία που σχετίζονται με το γνωστικό μου αντικείμενο. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον επιβλέποντα καθηγητή μου για την υποστήριξή του. Τέλος ευχαριστώ θερμά την κοπέλα μου και την οικογένεια μου για την ενθάρρυνση και τη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών».

Περίληψη

Η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων χωροθέτησης για νέες ενεργειακές εγκαταστάσεις. Ιδιαίτερα στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών σταθμών, η επιλογή κατάλληλων θέσεων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων, καθώς απαιτεί την ταυτόχρονη αξιολόγηση τεχνικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραγόντων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των σύγχρονων μεθοδολογιών χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω της συνδυασμένης χρήσης Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και μεθόδων Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Λήψης Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM).

Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και των πολυκριτηριακών μεθόδων αξιολόγησης, με ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους Analytic Hierarchy Process (AHP) και Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP). Στη συνέχεια αναλύεται η διαδικασία επιλογής και κατηγοριοποίησης των κριτηρίων, η στάθμισή τους, η σύνθεση δεικτών καταλληλότητας και η παραγωγή χαρτών καταλληλότητας μέσω τεχνικών χωρικής επικάλυψης. Παράλληλα, εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια αξιολόγησης και η επίδραση των διαφορετικών προσεγγίσεων στάθμισης στα τελικά αποτελέσματα.

Η εργασία περιλαμβάνει εκτενή ανασκόπηση διεθνών και ελληνικών μελετών περίπτωσης που εφαρμόζουν συνδυασμό GIS και πολυκριτηριακών μεθόδων για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής διερεύνησης καταδεικνύουν ότι η ηλιακή ακτινοβολία, οι χρήσεις γης, η κλίση του εδάφους, η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί αποτελούν τα σημαντικότερα κριτήρια αξιολόγησης. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι οι μέθοδοι Fuzzy AHP και οι υβριδικές προσεγγίσεις GIS–Fuzzy MCDM παρουσιάζουν αυξημένη αξιοπιστία στη διαχείριση της αβεβαιότητας και στην υποστήριξη σύνθετων χωρικών αποφάσεων. Τέλος, αναδεικνύεται η σημασία της ανάλυσης ευαισθησίας για την αξιολόγηση της σταθερότητας των αποτελεσμάτων και τη βελτίωση της αξιοπιστίας των μοντέλων χωροθέτησης.

Η εργασία συμβάλλει στη συστηματική κατανόηση των σύγχρονων προσεγγίσεων χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών και παρέχει ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό πλαίσιο

υποστήριξης αποφάσεων για τον ενεργειακό σχεδιασμό και την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης.

Λέξεις – Κλειδιά

Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (MCDM)

«Evaluation and Selection of Photovoltaic Plant Siting Using Multi-Criteria Analysis»

Abstract

The increasing penetration of renewable energy sources in the global energy system necessitates the development of effective siting methods for new energy installations. Particularly in the case of photovoltaic plants, the selection of suitable locations is a complex decision-making problem, as it requires the simultaneous evaluation of technical, environmental, economic and social factors. The purpose of this paper is to investigate modern methodologies for siting photovoltaic plants through the combined use of Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods.

Initially, the basic principles of Geographic Information Systems and multi-criteria evaluation methods are presented, with particular emphasis on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) methods. The process of selecting and categorizing the criteria, their weighting, the composition of suitability indices and the production of suitability maps through spatial overlay techniques are then analyzed. At the same time, alternative evaluation scenarios and the impact of different weighting approaches on the final results are examined.

The paper includes an extensive review of international and Greek case studies that apply a combination of GIS and multi-criteria methods for the siting of photovoltaic installations. The results of the literature review demonstrate that solar radiation, land uses, soil slope, distance from the power grid and environmental constraints are the most important evaluation criteria. Furthermore, it is found that Fuzzy AHP methods and GIS–Fuzzy MCDM hybrid approaches present increased reliability in managing uncertainty and supporting complex spatial decisions. Finally, the importance of sensitivity analysis for assessing the stability of the results and improving the reliability of the siting models is highlighted.

The work contributes to the systematic understanding of modern approaches to siting photovoltaic plants and provides a comprehensive theoretical framework for decision support for energy planning and the promotion of sustainable development.

Keywords

Photovoltaic Plants, Geographic Information Systems (GIS), Multi-Criteria Decision Analysis (MCDM).

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xiii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο και Σκοπός της Εργασίας	1
1.2 Ερευνητικά Ερωτήματα	3
1.3 Αναγκαιότητα και Σημασία της Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών.....	5
2. Θεωρητικό Πλαίσιο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση Λήψης Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM).....	9
2.1.1 Εισαγωγή στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση	9
2.1.2 Βασικές Αρχές της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (MCDM)	10
2.1.3 Κατηγορίες Μεθόδων MCDM.....	11
2.1.4 Η MCDM στον Ενεργειακό Σχεδιασμό	12
2.1.5 Σύγχρονες Τάσεις στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση	14
2.2 Μέθοδος AHP και Fuzzy AHP	16
2.2.1 Θεωρητική Θεμελίωση της AHP	16
2.2.2 Περιορισμοί της Κλασικής AHP.....	18
2.2.3 Ανάπτυξη της Fuzzy AHP	18
2.2.4 Σύγχρονες Εφαρμογές της Fuzzy AHP.....	20
2.2.5 Η Fuzzy AHP στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	21
2.2.6 Fuzzy AHP και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS).....	22
2.3 Συνδυασμός Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (MCDM) και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).....	24
2.3.1 Θεωρητική Θεμελίωση του GIS-MCDA	24
2.3.2 Γιατί συνδυάζονται GIS και MCDM	27
2.3.3 GIS-MCDM στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	28
2.3.4 GIS-MCDM για Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών	29
2.4 Κριτήρια Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών	31
2.4.1 Γενική Κατηγοριοποίηση Κριτηρίων Χωροθέτησης	32
2.4.2 Τεχνικά Κριτήρια Χωροθέτησης	32
2.4.3 Περιβαλλοντικά Κριτήρια.....	34
2.4.4 Οικονομικά Κριτήρια.....	35
2.4.5 Κοινωνικά και Θεσμικά Κριτήρια	35
3. Μεθοδολογικό Πλαίσιο.....	37
3.1 Επιλογή και Κατηγοριοποίηση Κριτηρίων	37
3.2 Διαδικασία Στάθμισης.....	40
3.2.1 Θεωρητική Βάση της Στάθμισης Κριτηρίων	40
3.2.2 Διαδικασία Στάθμισης με AHP	42
3.2.3 Διαδικασία Στάθμισης με Fuzzy AHP	47

3.2.4 Στάθμιση σε GIS–MCDM για Φωτοβολταϊκά	51
3.3 Σύνθεση Δείκτη Καταλληλότητας	54
3.3.1 Θεωρητική Βάση του Δείκτη Καταλληλότητας	54
3.3.2 Weighted Linear Combination (WLC)	56
3.3.3 Σύνθεση Δείκτη Καταλληλότητας με GIS–Fuzzy MCDM.....	58
3.3.4 Παραγωγή Χαρτών Καταλληλότητας.....	59
3.3.5 Σύγχρονες Εφαρμογές Δείκτη Καταλληλότητας	62
3.4 Εναλλακτικά Σενάρια Αξιολόγησης	64
4. Μελέτες Περίπτωσης Επιλογή Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών με τη Χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης.....	68
4.1. Εθνικό Επίπεδο – Ελλάδα	68
4.1.1 Εισαγωγή.....	68
4.1.2 Μελέτη Περίπτωσης Ρόδου	68
4.1.3 Μελέτη Περίπτωσης Καρπάθου.....	72
4.1.4 Μελέτη Περίπτωσης Υπεράκτιων Φωτοβολταϊκών στο Αιγαίο Πέλαγος (Vagiona et al., 2022).....	76
4.2. Μεσογειακές Χώρες.....	80
4.2.1 Νοτιοανατολική Ισπανία – Cartagena.....	80
4.2.2 Ιταλία – Χερσόνησος Gargano, Περιφέρεια Απουλίας	82
4.2.3 Πολωνία – Περιφέρεια Legionowo.....	85
4.2.4 Τουρκία – Επιλογή Θέσεων Πλωτών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων με GIS– FAHP.....	87
4.2.5 Ισπανία – Βέλτιστη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών με GIS και Πολυκριτηριακή Ανάλυση	90
4.3. Διεθνές Επίπεδο	92
4.3.1 Ιράν – Επιλογή Κατάλληλων Θέσεων Υπόγειων Φραγμάτων με GIS και Ασαφή Λογική.....	92
4.3.2 Εκουαδόρ (Νήσοι Γκαλαπάγκος) – Πολυκριτηριακή Ανάλυση για τη Χωροθέτηση Αιολικών και Φωτοβολταϊκών Σταθμών με GIS, AHP και OWA	95
4.3.3 Μελέτη Περίπτωσης Μέκκας, Σαουδική Αραβία	98
4.3.4 Μελέτη Περίπτωσης Σαουδικής Αραβίας.....	100
4.3.5 Μελέτη Περίπτωσης Πακιστάν – GIS και Μηχανική Μάθηση για τη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών	103
4.3.6 Μελέτη Περίπτωσης Ιράκ – GIS και AHP για τη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών	107
4.3.7 Μελέτη Περίπτωσης Νιγηρίας – GIS και AHP για τη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών στην Ikorodu.....	111
4.3.8 Μελέτη Περίπτωσης Τουρκίας – Ολοκληρωμένο Μοντέλο Fuzzy AHP–GIS– FIA για τη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών.....	114
5. Συμπεράσματα	117
Βιβλιογραφία.....	120

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1. Ταξινόμηση μεθόδων MCDM (MADM–MODM). Πηγή: Mugiyo et al., 2021	12
Εικόνα 2. Παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων για έργα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Πηγή: Τροποποίηση μετά από Polatidis et al. (2006)	14
Εικόνα 3. Βασική ιεραρχική δομή της μεθόδου AHP (Στόχος – Κριτήρια – Υποκριτήρια – Εναλλακτικές λύσεις)	17
Εικόνα 4. Αναπαράσταση τριγωνικού ασαφούς αριθμού (Triangular Fuzzy Number – TFN). Πηγή: Koohebanani et al., 2018	20
Εικόνα 5. Εννοιολογικό πλαίσιο ενσωμάτωσης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) για τη λήψη χωρικών αποφάσεων Πηγή: Τροποποίηση μετά από Ryan & Nimick, 2019	27
Εικόνα 6. Διαδικασία εφαρμογής GIS–MCDM για την αξιολόγηση καταλληλότητας και τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Πηγή: Ίδια επεξεργασία, βασισμένη στους Malczewski (2006), Malczewski & Rinner (2015), Shao et al. (2020), Zambrano-Asanza et al. (2021) και Almasad et al. (2023)	29
Εικόνα 7. Διαδικασία εντοπισμού βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω συνδυασμού ανάλυσης καταλληλότητας και ανάλυσης πυκνότητας ηλεκτρικού φορτίου. Πηγή: Zambrano-Asanza et al., 2021	31
Εικόνα 8. Ιεραρχική ταξινόμηση των κριτηρίων χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών. Πηγή: ίδια επεξεργασία βασισμένο στους Ghasempour et al., 2019 και Guaita-Pradas et al., 2019).	32
Εικόνα 9. Ιεραρχική δομή εφαρμογής της AHP για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Πηγή: Προσαρμογή από Noorollahi et al. (2016).	43
Εικόνα 10. Διαδικασία ανάπτυξης χάρτη καταλληλότητας φωτοβολταϊκών σταθμών με χρήση GIS και Fuzzy AHP. Πηγή: Προσαρμογή από Noorollahi et al. (2016).	47
Εικόνα 11. Μεθοδολογικός σχεδιασμός	70
Εικόνα 12. Τελικός χάρτης κατάλληλων περιοχών ή κατάταξης εναλλακτικών θέσεων	71
Εικόνα 13. Μεθοδολογικό διάγραμμα GIS–AHP–WLC της μελέτης	74
Εικόνα 14. Χάρτης τελικής καταλληλότητας φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην Κάρπαθο	75
Εικόνα 15. Τελικός χάρτης καταλληλότητας για αγροβολατικά Συστήματα (Χερσόνησος Gargano, Απούλια, Ιταλία)	84
Εικόνα 16. Χάρτης καταλληλότητας περιοχών για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών μετά την εφαρμογή της μεθόδου AHP–WLC	86
Εικόνα 17. Τελικός χάρτης καταλληλότητας εγκατάστασης πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων	89
Εικόνα 18. Τελικός χάρτης καταλληλότητας χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών	92
Εικόνα 19. Χάρτης πολυκριτηριακής αξιολόγησης καταλληλότητας για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών στα Νησιά Γκαλαπάγκος (GIS–AHP–OWA)	97
Εικόνα 20. Τελικός χάρτης βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών στη Μέκκα	100
Εικόνα 21. Τελικός χάρτης καταλληλότητας φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στη Σαουδική Αραβία	102
Εικόνα 22. Τελικός χάρτης καταλληλότητας φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων	106
Εικόνα 23. Τελικός χάρτης καταλληλότητας φωτοβολταϊκών σταθμών στο Ιράκ	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση των μεθόδων AHP, Fuzzy AHP, Fuzzy AHP–TOPSIS και Fuzzy AHP–VIKOR. Πηγή: Προσαρμογή από Kaya & Kahraman (2010), Heo et al. (2010), Taylan et al. (2020) , Luhaniwal et al. (2025), Tamtam & Tourabi (2025).....	21
Πίνακας 2. Τυχαίος Δείκτης (Random Index – RI). Πηγή: Saaty, 2005	46
Πίνακας 3. Αντιστοίχιση λεκτικών εκτιμήσεων και τριγωνικών ασαφών αριθμών (TFNs). Πηγή: Προσαρμογή της κλίμακας Saaty (1980, 2008) σε τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς βάσει των Buckley (1985), Chang (1996) και μεταγενέστερων εφαρμογών Fuzzy AHP..	49
Πίνακας 4 Σύγκριση σύγχρονων προσεγγίσεων κατασκευής δεικτών καταλληλότητας ...	64

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

AHP	Analytic Hierarchy Process (Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία)
ANP	Analytic Network Process (Αναλυτική Δικτυακή Διαδικασία)
BWM	Best-Worst Method (Μέθοδος Καλύτερου–Χειρότερου)
CR	Consistency Ratio (Λόγος Συνέπειας)
CI	Consistency Index (Δείκτης Συνέπειας)
DEM	Digital Elevation Model (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους)
DSS	Decision Support System (Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων)
EIA	Environmental Impact Assessment (Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων)
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία)
FIA	Fuzzy Information Axiom (Ασαφές Αξίωμα Πληροφορίας)
FMCDM	Fuzzy Multi-Criteria Decision Making (Ασαφής Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων)
GIS	Geographic Information System (Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών)
GPS	Global Positioning System (Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης)
GHI	Global Horizontal Irradiance (Οριζόντια Παγκόσμια Ηλιακή Ακτινοβολία)
LULC	Land Use / Land Cover (Χρήσεις και Καλύψεις Γης)
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis (Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων)
MCDM	Multi-Criteria Decision Making (Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων)
Natura 2000	Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Προστατευόμενων Περιοχών
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
PV	Photovoltaic (Φωτοβολταϊκό)
RES	Renewable Energy Sources (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας)
SI	Suitability Index (Δείκτης Καταλληλότητας)
SPP	Solar Power Plant (Φωτοβολταϊκός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας)

TFN	Triangular Fuzzy Number (Τριγωνικός Ασαφής Αριθμός)
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
VIKOR	VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje (Μέθοδος Συμβιβαστικής Κατάταξης)
WLC	Weighted Linear Combination (Σταθμισμένος Γραμμικός Συνδυασμός)
WT	Wind Turbine (Ανεμογεννήτρια)
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΜΠΕ	Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά Συστήματα
Υ/Σ	Υποσταθμός Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και Σκοπός της Εργασίας

Η παγκόσμια ενεργειακή πολιτική τα τελευταία χρόνια χαρακτηρίζεται από μια έντονη στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), ως απάντηση στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής, της ενεργειακής ασφάλειας και της ανάγκης μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα αποτελεί βασική προτεραιότητα διεθνών οργανισμών, κυβερνήσεων και επενδυτών, καθώς ο ενεργειακός τομέας ευθύνεται για σημαντικό ποσοστό των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (European Commission, 2022; IEA, 2024; IRENA, 2023).

Στο πλαίσιο αυτό, η ηλιακή ενέργεια και ειδικότερα η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχουν αναδειχθεί ως μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency - IEA), τα φωτοβολταϊκά συστήματα αναμένεται να αποτελέσουν τον βασικό μοχλό αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά την περίοδο έως το 2028, συνεισφέροντας καθοριστικά στην επίτευξη των διεθνών στόχων απανθρακοποίησης (IEA, 2024). Αντίστοιχα, η International Renewable Energy Agency (IRENA) επισημαίνει ότι η συνεχής μείωση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας των φωτοβολταϊκών σταθμών, σε συνδυασμό με τη βελτίωση της τεχνολογικής τους απόδοσης, καθιστά τα φωτοβολταϊκά μία από τις πλέον ανταγωνιστικές μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διεθνώς (IRENA, 2023).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ιδιαίτερα φιλόδοξους στόχους για την αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο, με την ηλιακή ενέργεια να κατέχει κεντρικό ρόλο στη στρατηγική αυτή. Μέσω της «EU Solar Energy Strategy», η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προωθεί τη σημαντική επιτάχυνση της ανάπτυξης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, αναγνωρίζοντας τη συμβολή τους τόσο στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όσο και στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας της Ευρώπης (European Commission, 2022). Παράλληλα, σύμφωνα με την έκθεση «EU Market Outlook for Solar Power 2023–2027», η αγορά φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη συνεχίζει να αναπτύσσεται με ιδιαίτερα υψηλούς ρυθμούς, καταγράφοντας ιστορικά επίπεδα νέων εγκαταστάσεων και επενδύσεων (SolarPower Europe, 2023).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών σταθμών, η αποτελεσματική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης. Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων, καθώς επηρεάζεται από πληθώρα τεχνικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραγόντων. Η ηλιακή ακτινοβολία, η μορφολογία του εδάφους, οι χρήσεις γης, η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο, η προσβασιμότητα, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί και η κοινωνική αποδοχή αποτελούν ορισμένα μόνο από τα κριτήρια που πρέπει να συνεκτιμηθούν κατά τη διαδικασία επιλογής κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης (Charabi & Gastli, 2011; Tahri et al., 2015; Sánchez-Lozano et al., 2013; Zambrano-Asanza et al., 2021).

Η διεθνής βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η ακατάλληλη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ενεργειακή απόδοση, αυξημένο κόστος επένδυσης και λειτουργίας, συγκρούσεις με άλλες χρήσεις γης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και δυσκολίες σύνδεσης με τα ηλεκτρικά δίκτυα (Tahri et al., 2015; Zambrano-Asanza et al., 2021). Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες επισημαίνουν ότι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων σε ευαίσθητες περιβαλλοντικά περιοχές, όπως οι περιοχές του δικτύου Natura 2000, μπορεί να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και στον κατακερματισμό του τοπίου, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή τεκμηριωμένων διαδικασιών χωρικού σχεδιασμού (Faraslis et al., 2025).

Για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας του προβλήματος έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης λήψης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM), οι οποίες επιτρέπουν την ταυτόχρονη αξιολόγηση πολλαπλών και συχνά αντικρουόμενων κριτηρίων. Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων συγκαταλέγονται η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process – AHP) και οι ασαφείς επεκτάσεις της (Fuzzy AHP), οι οποίες έχουν εφαρμοστεί εκτενώς στη χωροθέτηση έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Saaty, 2008; Tarife et al., 2023; Malinić et al., 2025). Ο συνδυασμός των μεθόδων αυτών με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information Systems – GIS) παρέχει ένα ισχυρό πλαίσιο υποστήριξης χωρικών αποφάσεων, επιτρέποντας την ανάλυση μεγάλου όγκου γεωχωρικών δεδομένων και την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας (Malczewski, 2006; Sánchez-Lozano et al., 2013; Roman et al., 2026).

Αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας είναι η αξιολόγηση και επιλογή κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω της εφαρμογής πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον GIS. Η εργασία επιδιώκει να αναπτύξει ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο χωρικής αξιολόγησης, το οποίο θα βασίζεται σε τεχνικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια και θα αξιοποιεί σύγχρονες τεχνικές πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων.

Ειδικότερα, στόχος της εργασίας είναι η επιλογή και κατηγοριοποίηση των κατάλληλων κριτηρίων χωροθέτησης, η στάθμισή τους μέσω μεθόδων AHP ή/και Fuzzy AHP, η ανάπτυξη θεματικών χαρτών καταλληλότητας και η σύνθεση ενός ολοκληρωμένου δείκτη καταλληλότητας για την αξιολόγηση εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών. Παράλληλα, η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στην ενίσχυση της επιστημονικής γνώσης σχετικά με τη χωρική υποστήριξη αποφάσεων για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να προσφέρει ένα πρακτικό εργαλείο για φορείς σχεδιασμού, δημόσιες αρχές, επενδυτές και μηχανικούς που δραστηριοποιούνται στον τομέα της ηλιακής ενέργειας.

1.2 Ερευνητικά Ερωτήματα

Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων, στο οποίο πρέπει να συνυπολογιστούν πολλαπλά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια τεχνικής, περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής φύσεως. Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη προηγμένων μεθοδολογιών πολυκριτηριακής ανάλυσης λήψης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM), οι οποίες αποσκοπούν στην υποστήριξη της διαδικασίας επιλογής των πλέον κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης (Zambrano-Asanza et al., 2021; Yildiz et al., 2025; Zandi & Lotfata, 2025).

Παρά την εκτεταμένη χρήση μεθόδων όπως η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP), η Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Fuzzy AHP), η TOPSIS, η VIKOR και νεότερες προσεγγίσεις όπως η Best-Worst Method (BWM), εξακολουθεί να υπάρχει προβληματισμός σχετικά με το ποια μέθοδος αποδίδει τα πλέον αξιόπιστα και σταθερά αποτελέσματα κατά τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Επιπλέον, η διαφοροποίηση των βαρών που αποδίδονται στα επιμέρους κριτήρια μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα της αξιολόγησης, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη

διερεύνηση της ευαισθησίας των μοντέλων λήψης αποφάσεων (Yildiz et al., 2025; Zandi & Lotfata, 2025).

Σύμφωνα με τον Zambrano-Asanza et al. (2021), η βέλτιστη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαθεσιμότητα ηλιακού δυναμικού, αλλά επηρεάζεται και από παράγοντες όπως οι χρήσεις γης, η τοπογραφία, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, η εγγύτητα σε ηλεκτρικές υποδομές και η χωρική κατανομή της ενεργειακής ζήτησης. Αντίστοιχα, οι Yildiz et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης και από τη διαδικασία στάθμισης των κριτηρίων, ενώ οι Zandi & Lotfata (2025) επισημαίνουν ότι διαφορετικές μέθοδοι MCDM μπορεί να παράγουν διαφορετικές ιεραρχήσεις των ίδιων εναλλακτικών θέσεων, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη συγκριτικής αξιολόγησης των διαθέσιμων προσεγγίσεων.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα εργασία επιδιώκει να διερευνήσει τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

Ερευνητικό Ερώτημα 1

Ποια τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια επηρεάζουν περισσότερο την καταλληλότητα μιας περιοχής για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών;

Το ερώτημα αυτό εστιάζει στον εντοπισμό και την αξιολόγηση των σημαντικότερων παραγόντων που καθορίζουν την καταλληλότητα μιας θέσης. Η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρει ως κυριότερα κριτήρια την ηλιακή ακτινοβολία, την κλίση και τον προσανατολισμό του εδάφους, τις χρήσεις γης, την απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, την προσβασιμότητα μέσω οδικού δικτύου και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς που σχετίζονται με προστατευόμενες περιοχές και ευαίσθητα οικοσυστήματα (Zambrano-Asanza et al., 2021; Yildiz et al., 2025).

Ερευνητικό Ερώτημα 2

Ποια μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης λήψης αποφάσεων μπορεί να παρέχει τα πλέον αξιόπιστα αποτελέσματα για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών;

Το ερώτημα αυτό αφορά τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων MCDM που χρησιμοποιούνται διεθνώς στη χωροθέτηση ενεργειακών έργων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον

παρουσιάζει η αξιολόγηση της μεθόδου AHP και των ασαφών επεκτάσεών της (Fuzzy AHP), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στη σχετική βιβλιογραφία λόγω της δυνατότητας τους να ενσωματώνουν κρίσεις ειδικών και να διαχειρίζονται την αβεβαιότητα κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Yildiz et al., 2025; Zandi & Lotfata, 2025).

Ερευνητικό Ερώτημα 3

Πώς επηρεάζονται τα αποτελέσματα της χωροθέτησης από μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων αξιολόγησης;

Η διαδικασία στάθμισης αποτελεί κρίσιμο στάδιο σε κάθε πολυκριτηριακή ανάλυση, καθώς τα βάρη αντανακλούν τη σχετική σημασία που αποδίδεται σε κάθε κριτήριο. Ωστόσο, διαφορετικές εκτιμήσεις ειδικών ή διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά σύνολα βαρών και, κατά συνέπεια, σε διαφορετικά αποτελέσματα καταλληλότητας. Για τον λόγο αυτό, η διερεύνηση της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε μεταβολές των βαρών αποτελεί βασική παράμετρο αξιολόγησης της αξιοπιστίας και της σταθερότητας του προτεινόμενου μοντέλου χωροθέτησης (Yildiz et al., 2025; Zandi & Lotfata, 2025).

Η απάντηση στα παραπάνω ερευνητικά ερωτήματα αναμένεται να συμβάλει τόσο στη βελτίωση της επιστημονικής γνώσης σχετικά με τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών όσο και στην ανάπτυξη ενός αξιόπιστου πλαισίου υποστήριξης αποφάσεων για φορείς σχεδιασμού, δημόσιες υπηρεσίες, επενδυτές και μηχανικούς που δραστηριοποιούνται στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.3 Αναγκαιότητα και Σημασία της Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών

Η ραγδαία ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων κατά την τελευταία δεκαετία έχει καταστήσει τη χωροθέτηση των έργων αυτών ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα στον τομέα του ενεργειακού σχεδιασμού. Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα, σε συνδυασμό με τους διεθνείς στόχους για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, δημιουργεί την ανάγκη για ανάπτυξη νέων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε μεγάλη κλίμακα (IEA, 2024). Ωστόσο, η επιτυχία των επενδύσεων αυτών δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογία ή τη διαθεσιμότητα του ηλιακού δυναμικού, αλλά σε σημαντικό βαθμό από την επιλογή κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης.

Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία λήψης αποφάσεων, καθώς απαιτεί την ταυτόχρονη συνεκτίμηση τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η επιλογή ακατάλληλων θέσεων μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος κατασκευής, λειτουργίας και σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, μειώνοντας τη συνολική βιωσιμότητα των επενδύσεων. Σύμφωνα με τους Zambrano-Asanza et al. (2021), η απόσταση από τις υποδομές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα χωροθέτησης, καθώς η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών σε απομακρυσμένες περιοχές απαιτεί εκτεταμένα έργα διασύνδεσης και συνεπάγεται σημαντική αύξηση του κόστους επένδυσης. Επιπλέον, η χωρική κατανομή της ενεργειακής ζήτησης επηρεάζει την αποτελεσματική ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συνεκτίμηση τόσο της προσφοράς όσο και της ζήτησης ενέργειας κατά τη διαδικασία επιλογής θέσεων (Zambrano-Asanza et al., 2021).

Πέραν των οικονομικών παραμέτρων, η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών συνδέεται άμεσα με ζητήματα περιβαλλοντικής προστασίας και βιώσιμης διαχείρισης των φυσικών πόρων. Η επέκταση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε περιοχές υψηλής οικολογικής αξίας μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια βιοτόπων, κατακερματισμό του τοπίου και υποβάθμιση οικοσυστημάτων. Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι περιοχές του δικτύου Natura 2000, οι οποίες έχουν θεσμοθετηθεί για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και των προστατευόμενων ειδών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σύμφωνα με τους Faraslis et al. (2025), η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων εντός προστατευόμενων περιοχών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη δομή και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων, αυξάνοντας τον κατακερματισμό του τοπίου και μεταβάλλοντας κρίσιμα ενδιαίτηματα ειδών που προστατεύονται από την ευρωπαϊκή περιβαλλοντική νομοθεσία. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η απουσία επαρκούς χωρικού σχεδιασμού και επιστημονικά τεκμηριωμένων κριτηρίων μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ακόμη και όταν τα έργα αποσκοπούν στην παραγωγή καθαρής ενέργειας.

Παράλληλα, η λανθασμένη χωροθέτηση μπορεί να επηρεάσει αρνητικά και την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών σταθμών. Η ηλιακή ακτινοβολία, η κλίση και ο προσανατολισμός του εδάφους, οι τοπικές κλιματικές συνθήκες και η παρουσία σκιάσεων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που καθορίζουν το επίπεδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Θέσεις με χαμηλότερο ηλιακό δυναμικό ή δυσμενή γεωμορφολογικά

χαρακτηριστικά οδηγούν σε μειωμένη ενεργειακή απόδοση και χαμηλότερη οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης. Για τον λόγο αυτό, η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι η βέλτιστη χωροθέτηση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής και τη βελτίωση του βαθμού αξιοποίησης των διαθέσιμων φυσικών πόρων (Zambrano-Asanza et al., 2021).

Επιπλέον, η κοινωνική διάσταση της χωροθέτησης αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Αν και τα φωτοβολταϊκά συστήματα θεωρούνται γενικά φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες, η εγκατάστασή τους σε ακατάλληλες θέσεις μπορεί να προκαλέσει αντιδράσεις από τις τοπικές κοινωνίες. Οι συγκρούσεις αυτές συνδέονται συνήθως με ζητήματα αλλοίωσης του τοπίου, μεταβολής των χρήσεων γης, πιθανών επιπτώσεων στη γεωργική δραστηριότητα και αντιλήψεων σχετικά με την περιβαλλοντική υποβάθμιση συγκεκριμένων περιοχών. Η κοινωνική αποδοχή των έργων ΑΠΕ θεωρείται σήμερα βασικός παράγοντας επιτυχούς υλοποίησης, καθώς η έλλειψή της μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις, δικαστικές προσφυγές ή ακόμη και ακύρωση επενδυτικών σχεδίων. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση κοινωνικών παραμέτρων στη διαδικασία χωροθέτησης αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη βιώσιμη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών σταθμών.

Η σημασία της ορθής χωροθέτησης ενισχύεται ακόμη περισσότερο από τις προβλέψεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, σύμφωνα με τις οποίες η ηλιακή ενέργεια θα αποτελέσει την κυρίαρχη τεχνολογία ανάπτυξης νέας εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ κατά τις επόμενες δεκαετίες (IEA, 2024). Η αυξημένη ζήτηση για νέες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συνεπάγεται μεγαλύτερες πιέσεις στις διαθέσιμες εκτάσεις και καθιστά αναγκαία την εφαρμογή τεκμηριωμένων και επιστημονικά αξιόπιστων διαδικασιών χωρικού σχεδιασμού. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης λήψης αποφάσεων (MCDM) προσφέρει τη δυνατότητα ολοκληρωμένης αξιολόγησης των εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής, στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην ενίσχυση της κοινωνικής αποδοχής των έργων.

Συνεπώς, η ορθή χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών δεν αποτελεί απλώς ένα τεχνικό ζήτημα επιλογής τοποθεσίας, αλλά έναν κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει την οικονομική βιωσιμότητα, την περιβαλλοντική αειφορία και την κοινωνική αποδοχή των έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάπτυξη αξιόπιστων μεθοδολογιών χωρικής

αξιολόγησης καθίσταται επομένως απαραίτητη προκειμένου να διασφαλιστεί η αποτελεσματική συμβολή των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ενεργειακή μετάβαση και στους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης.

2. Θεωρητικό Πλαίσιο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση Λήψης Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM)

2.1.1 Εισαγωγή στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Η λήψη αποφάσεων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες στον σχεδιασμό και τη διαχείριση τεχνικών, περιβαλλοντικών και ενεργειακών συστημάτων. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων προβλημάτων έχει καταστήσει ανεπαρκείς τις παραδοσιακές μεθόδους λήψης αποφάσεων που βασίζονται σε ένα μόνο κριτήριο βελτιστοποίησης, όπως το ελάχιστο κόστος ή η μέγιστη απόδοση. Στην πράξη, οι αποφάσεις αφορούν συνήθως την ταυτόχρονη αξιολόγηση τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων, οι οποίες συχνά αλληλεπιδρούν ή ακόμη και συγκρούονται μεταξύ τους. Η ανάγκη αντιμετώπισης τέτοιων σύνθετων προβλημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Λήψης Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM), η οποία σήμερα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κλάδους της Επιχειρησιακής Έρευνας και της θεωρίας αποφάσεων (Keeney & Raiffa, 1976).

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο στον σχεδιασμό σύνθετων τεχνικών, περιβαλλοντικών και ενεργειακών συστημάτων. Στη σύγχρονη εποχή, τα περισσότερα προβλήματα σχεδιασμού χαρακτηρίζονται από την ταυτόχρονη παρουσία πολλαπλών στόχων, αντικρουόμενων συμφερόντων και διαφορετικών κριτηρίων αξιολόγησης. Η παραδοσιακή προσέγγιση της βελτιστοποίησης ενός μόνο κριτηρίου (π.χ. ελάχιστο κόστος ή μέγιστη απόδοση) δεν επαρκεί πλέον για την αντιμετώπιση των σύνθετων προκλήσεων που ανακύπτουν στον ενεργειακό σχεδιασμό και ιδιαίτερα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Keeney & Raiffa, 1976; Pohekar & Ramachandran, 2004).

Οι Keeney & Raiffa (1976) διαμόρφωσαν τις θεωρητικές βάσεις της λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων, εισάγοντας την έννοια των συμβιβασμών (trade-offs) μεταξύ αντικρουόμενων κριτηρίων. Σύμφωνα με την προσέγγισή τους, η επιλογή μιας εναλλακτικής λύσης δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση ενός μόνο παράγοντα, αλλά απαιτεί τη συνεκτίμηση των επιπτώσεων που προκύπτουν σε διαφορετικές διαστάσεις του προβλήματος. Η φιλοσοφία αυτή αποτέλεσε το θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη των σύγχρονων πολυκριτηριακών μεθόδων, οι οποίες

επιτρέπουν τη συστηματική αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων υπό συνθήκες πολυπλοκότητας και αβεβαιότητας.

Σύμφωνα με τους Belton και Stewart (2002), η πολυκριτηριακή ανάλυση δεν αποσκοπεί στην αναζήτηση μιας απόλυτα βέλτιστης λύσης, αλλά στην υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων μέσω της ενσωμάτωσης των προτιμήσεων των εμπλεκόμενων φορέων και της αξιολόγησης των διαθέσιμων επιλογών. Η MCDM λειτουργεί ως ένα πλαίσιο σύνθεσης πληροφοριών, στο οποίο ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα συνδυάζονται προκειμένου να παραχθεί μια συνολική εκτίμηση της καταλληλότητας των εναλλακτικών λύσεων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διαφάνεια στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και διευκολύνεται η τεκμηρίωση των τελικών επιλογών.

Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Λήψης Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) αναπτύχθηκε ακριβώς για να υποστηρίξει τέτοιου είδους προβλήματα. Αποτελεί κλάδο της Επιχειρησιακής Έρευνας (Operations Research) και περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών και λογικών τεχνικών που επιτρέπουν την αξιολόγηση και κατάταξη εναλλακτικών λύσεων βάσει πολλαπλών κριτηρίων (Triantaphyllou, 2000).

2.1.2 Βασικές Αρχές της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (MCDM)

Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Λήψης Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει προβλήματα στα οποία η λήψη αποφάσεων δεν μπορεί να βασιστεί σε ένα μόνο κριτήριο, αλλά απαιτεί την ταυτόχρονη αξιολόγηση πολλών και συχνά αντικρουόμενων παραμέτρων. Στην πραγματικότητα, τα περισσότερα προβλήματα σχεδιασμού και διαχείρισης χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων, διαφορετικών ενδιαφερόμενων φορέων, συγκρουόμενων στόχων και σημαντικού βαθμού αβεβαιότητας. Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά αναγκαία την εφαρμογή συστηματικών μεθόδων αξιολόγησης που μπορούν να ενσωματώσουν τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά δεδομένα σε ένα ενιαίο πλαίσιο λήψης αποφάσεων (Belton & Stewart, 2002).

Σύμφωνα με τους Belton και Stewart (2002), η πολυκριτηριακή ανάλυση δεν αποσκοπεί απαραίτητα στον εντοπισμό μιας απόλυτα βέλτιστης λύσης, αλλά στην υποστήριξη της διαδικασίας επιλογής της πλέον κατάλληλης εναλλακτικής, λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων και τους περιορισμούς του προβλήματος. Η προσέγγιση

αυτή επιτρέπει τη συνεκτίμηση διαφορετικών διαστάσεων ενός ζητήματος και συμβάλλει στη διαφάνεια και την τεκμηρίωση των αποφάσεων.

Ένα τυπικό πρόβλημα MCDM περιλαμβάνει ορισμένα βασικά στοιχεία τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κατά τη διαδικασία αξιολόγησης. Σύμφωνα με τους Kumar et al. (2017), τα στοιχεία αυτά είναι ο στόχος της απόφασης, οι διαθέσιμες εναλλακτικές λύσεις, τα κριτήρια αξιολόγησης, οι προτιμήσεις των εμπλεκόμενων φορέων και τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας αξιολόγησης. Η αποτελεσματικότητα της πολυκριτηριακής ανάλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σωστό καθορισμό των παραπάνω στοιχείων, καθώς και από την ορθή αναπαράσταση των σχέσεων που αναπτύσσονται μεταξύ τους.

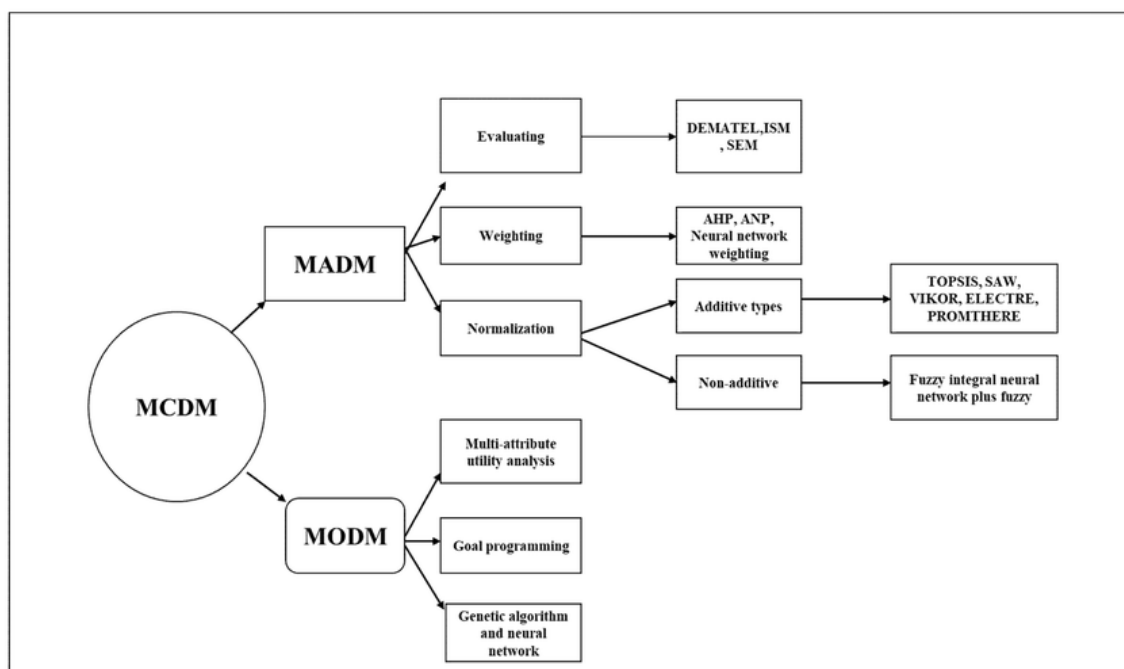
Ιδιαίτερη σημασία έχει η δυνατότητα της MCDM να συνδυάζει πληροφορίες διαφορετικής φύσης. Σε πολλές περιπτώσεις, τα διαθέσιμα δεδομένα προέρχονται από τεχνικούς, οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς τομείς, ενώ παράλληλα ενσωματώνονται οι απόψεις ειδικών και οι προτιμήσεις των ενδιαφερόμενων μερών. Η σύνθεση αυτών των πληροφοριών σε ένα κοινό πλαίσιο αξιολόγησης επιτρέπει την ολοκληρωμένη διερεύνηση σύνθετων προβλημάτων και καθιστά τις πολυκριτηριακές μεθόδους ιδιαίτερα χρήσιμες σε ζητήματα ενεργειακού και χωροταξικού σχεδιασμού (Belton & Stewart, 2002; Kumar et al., 2017).

2.1.3 Κατηγορίες Μεθόδων MCDM

Η πολυκριτηριακή ανάλυση περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μεθόδων, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο διαχείρισης των κριτηρίων και των εναλλακτικών λύσεων. Η διεθνής βιβλιογραφία διακρίνει δύο βασικές κατηγορίες πολυκριτηριακών μεθόδων: τη λήψη αποφάσεων πολλαπλών χαρακτηριστικών (Multi-Attribute Decision Making – MADM) και τη λήψη αποφάσεων πολλαπλών στόχων (Multi-Objective Decision Making – MODM) (Triantaphyllou, 2000; Abu Taha & Daim, 2013; Mugiyo et al., 2021).

Οι μέθοδοι MADM εφαρμόζονται όταν υπάρχει ένα συγκεκριμένο και πεπερασμένο σύνολο εναλλακτικών λύσεων που αξιολογούνται με βάση διάφορα κριτήρια. Στην περίπτωση αυτή, η ανάλυση επικεντρώνεται στην επιλογή ή την κατάταξη της πλέον κατάλληλης εναλλακτικής λύσης. Αντίθετα, οι μέθοδοι MODM χρησιμοποιούνται σε προβλήματα βελτιστοποίησης, όπου οι εναλλακτικές λύσεις δεν είναι προκαθορισμένες αλλά παράγονται μέσω μαθηματικών μοντέλων, με στόχο την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλών αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι μέθοδοι MADM

περιλαμβάνουν διάφορες υποκατηγορίες τεχνικών. Μία σημαντική ομάδα είναι οι μέθοδοι στάθμισης, στις οποίες ανήκουν το Γραμμικό Προσθετικό Μοντέλο (Linear Additive Model), η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) και η Θεωρία Χρησιμότητας Πολλαπλών Χαρακτηριστικών (MAUT). Παράλληλα, υπάρχουν οι μέθοδοι προγραμματισμού πολλαπλών στόχων, οι οποίες βασίζονται σε τεχνικές βελτιστοποίησης, καθώς και οι προσεγγίσεις υπεροχής (outranking methods), όπως οι ELECTRE και PROMETHEE, οι οποίες βασίζονται σε συγκρίσεις μεταξύ εναλλακτικών λύσεων και χρησιμοποιούνται ευρέως σε προβλήματα περιβαλλοντικού και ενεργειακού σχεδιασμού. Η διάκριση μεταξύ MADM και MODM θεωρείται θεμελιώδης στη θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης και αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 1 (Mugiyo et al., 2021).



Εικόνα 1. Ταξινόμηση μεθόδων MCDM (MADM–MODM). Πηγή: Mugiyo et al., 2021

2.1.4 Η MCDM στον Ενεργειακό Σχεδιασμό

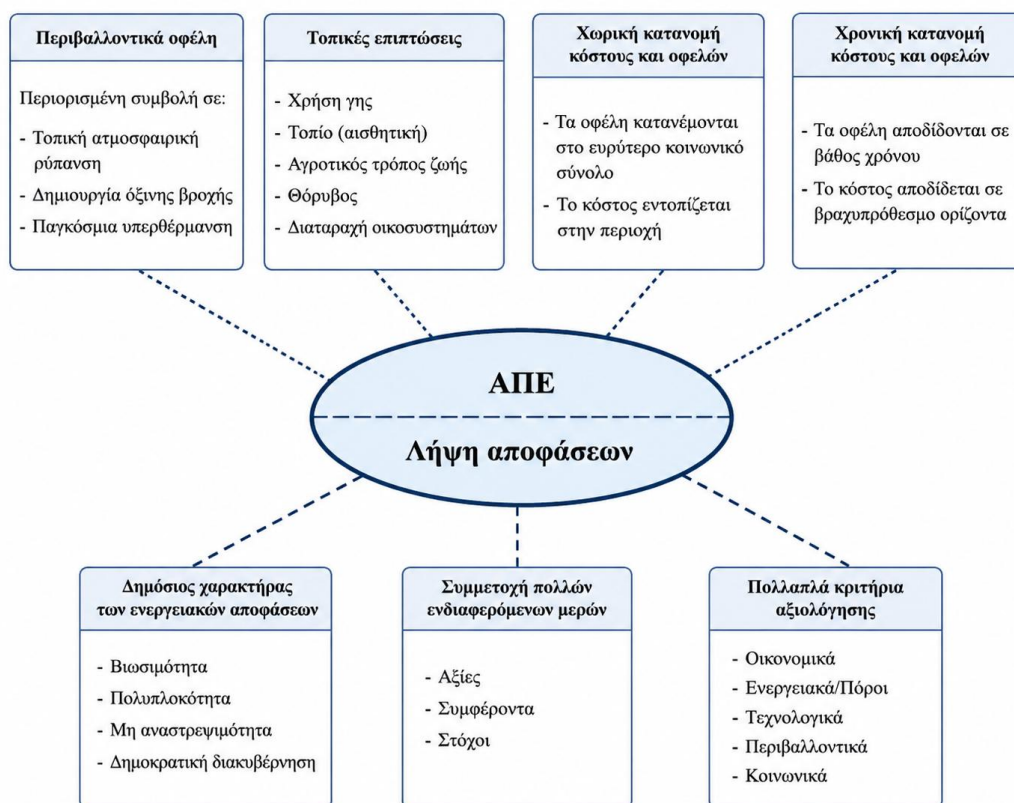
Η εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης στον ενεργειακό σχεδιασμό άρχισε να αναπτύσσεται συστηματικά από τη δεκαετία του 1980, όταν οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις της ενεργειακής πολιτικής άρχισαν να αποκτούν αυξανόμενη σημασία. Μέχρι τότε, η αξιολόγηση ενεργειακών έργων βασιζόταν κυρίως σε οικονομικές αναλύσεις και σε προσεγγίσεις κόστους-οφέλους. Ωστόσο, η ανάγκη ενσωμάτωσης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, κοινωνικών παραγόντων και ζητημάτων βιωσιμότητας

κατέστησε αναγκαία την υιοθέτηση πιο ολοκληρωμένων εργαλείων λήψης αποφάσεων (Pohekar & Ramachandran, 2004).

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενίσχυσε ακόμη περισσότερο τη σημασία των πολυκριτηριακών μεθόδων. Η επιλογή ενεργειακών τεχνολογιών και η χωροθέτηση ενεργειακών εγκαταστάσεων απαιτούν τη συνεκτίμηση μεγάλου αριθμού παραγόντων, οι οποίοι συχνά είναι αντικρουόμενοι. Για παράδειγμα, μία περιοχή μπορεί να παρουσιάζει υψηλό ενεργειακό δυναμικό αλλά ταυτόχρονα να βρίσκεται κοντά σε προστατευόμενες περιοχές ή να προκαλεί κοινωνικές αντιδράσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι πολυκριτηριακές μέθοδοι παρέχουν ένα αποτελεσματικό πλαίσιο αξιολόγησης και υποστήριξης αποφάσεων.

Οι Polatidis et al. (2006) υποστηρίζουν ότι τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χαρακτηρίζονται από αποκεντρωμένη παραγωγή, εμπλοκή πολλών ενδιαφερόμενων μερών, μακροχρόνιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και σημαντικές κοινωνικές διαστάσεις. Ως αποτέλεσμα, η λήψη αποφάσεων δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε οικονομικούς δείκτες, αλλά απαιτεί την ταυτόχρονη αξιολόγηση τεχνικών, περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων. Η MCDM προσφέρει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης όλων αυτών των παραγόντων σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης, συμβάλλοντας στη λήψη περισσότερο τεκμηριωμένων και ισορροπημένων αποφάσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, το διάγραμμα των Polatidis et al. (2006) αποτυπώνει παραστατικά τον τρόπο με τον οποίο οι οικονομικοί, τεχνικοί, περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί παράγοντες συνδέονται με τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο κέντρο της εικόνας 2 βρίσκεται η διαδικασία λήψης αποφάσεων (Decision Making) σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (RES – Renewable Energy Sources), η οποία επηρεάζεται από ένα σύνολο αλληλένδετων τεχνικών, οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων.



Εικόνα 2. Παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων για έργα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Πηγή: Τροποποίηση μετά από Polatidis et al. (2006)

Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών, καθώς επιτρέπει τη συνεκτίμηση όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την καταλληλότητα μιας περιοχής και συμβάλλει στην επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης.

2.1.5 Σύγχρονες Τάσεις στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Κατά την τελευταία δεκαετία παρατηρείται ιδιαίτερα έντονη αύξηση των εφαρμογών πολυκριτηριακής ανάλυσης στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εξέλιξη αυτή συνδέεται άμεσα με την παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση και την ανάγκη ανάπτυξης εργαλείων που μπορούν να διαχειριστούν την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ενεργειακών συστημάτων.

Η εκτενής ανασκόπηση των Estévez et al. (2021), η οποία βασίστηκε στην ανάλυση 184 επιστημονικών δημοσιεύσεων, κατέδειξε ότι οι περισσότερες εφαρμογές MCDA αφορούν την αιολική και ηλιακή ενέργεια, ενώ σημαντικός αριθμός μελετών σχετίζεται με τη βιοενέργεια και τις θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές. Η μελέτη ανέδειξε επίσης ότι η μέθοδος

AHP εξακολουθεί να αποτελεί τη δημοφιλέστερη τεχνική πολυκριτηριακής ανάλυσης, κυρίως λόγω της ευκολίας εφαρμογής και της δυνατότητας ενσωμάτωσης υποκειμενικών κρίσεων ειδικών. Παράλληλα, οι συγγραφείς εντόπισαν σημαντικά ερευνητικά κενά όσον αφορά τη συμμετοχή των πολιτών και των τοπικών κοινωνιών στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, καθώς η πλειονότητα των εφαρμογών βασίζεται αποκλειστικά στις απόψεις ειδικών.

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και από τη μελέτη των Rahman et al. (2022), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι οι μέθοδοι AHP, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE και PROMETHEE κυριαρχούν στον ενεργειακό σχεδιασμό, με την AHP να εμφανίζει τη μεγαλύτερη συχνότητα χρήσης. Η ευρεία εφαρμογή της αποδίδεται στην απλότητα της διαδικασίας και στη δυνατότητα ιεράρχησης των κριτηρίων μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη.

Πιο πρόσφατα, οι Sahoo et al. (2025), μέσα από βιβλιομετρική ανάλυση 4.101 επιστημονικών δημοσιεύσεων, κατέγραψαν τη σταδιακή μετάβαση από τις κλασικές πολυκριτηριακές μεθόδους σε υβριδικά μοντέλα που συνδυάζουν ασαφή λογική, τεχνητή νοημοσύνη, αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και τεχνικές βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η μελλοντική εξέλιξη της MCDM αναμένεται να συνδεθεί στενά με την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, ικανών να διαχειρίζονται μεγάλους όγκους δεδομένων και να παρέχουν περισσότερο αξιόπιστες λύσεις για πολύπλοκα προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού.

Οι μελέτες αυτές αναδεικνύουν τη στροφή της διεθνούς έρευνας προς υβριδικά μοντέλα που συνδυάζουν πολυκριτηριακές τεχνικές με ασαφή λογική (Fuzzy Logic), τεχνητή νοημοσύνη, αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Η τάση αυτή αντανακλά την ανάγκη αποτελεσματικότερης διαχείρισης της αβεβαιότητας και της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των ενεργειακών συστημάτων. Η συμβολή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) στην εφαρμογή της MCDA είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα διαχείρισης και ανάλυσης μεγάλου όγκου χωρικών δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές και παρουσιάζουν διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες (Adem Esmail & Geneletti, 2018). Μέσω των GIS, τα επιμέρους θεματικά επίπεδα πληροφορίας μπορούν να συνδυαστούν ώστε να παραχθεί ένας ενιαίος δείκτης καταλληλότητας, ο οποίος αποτυπώνει τη συνολική αξιολόγηση μιας περιοχής. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τα GIS ιδιαίτερα

αποτελεσματικά εργαλεία για γρήγορη και οικονομικά αποδοτική ανάλυση σύνθετων χωρικών προβλημάτων (Greene et al., 2011). Οι προσεγγίσεις MCDA που βασίζονται σε GIS επιτρέπουν την αξιολόγηση πολλών μεταβλητών ταυτόχρονα, ενώ κάθε παράμετρος μπορεί να σταθμιστεί ανάλογα με τη σχετική της σημασία για το υπό εξέταση πρόβλημα. Ωστόσο, η διαδικασία ανάπτυξης ενός δείκτη καταλληλότητας δεν είναι απαλλαγμένη από δυσκολίες, καθώς βασίζεται στη σύνθεση ετερογενών δεδομένων και απαιτεί τον καθορισμό βαρών για τα επιμέρους κριτήρια. Η επιλογή των βαρών αυτών συχνά επηρεάζεται από την κρίση των ειδικών και συνεπώς ενέχει έναν βαθμό υποκειμενικότητας, γεγονός που αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις των πολυκριτηριακών προσεγγίσεων (Mugiyo et al., 2021).

Συνολικά, η πολυκριτηριακή ανάλυση λήψης αποφάσεων έχει εξελιχθεί σε ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η δυνατότητά της να συνδυάζει τεχνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές παραμέτρους σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για προβλήματα χωροθέτησης και σχεδιασμού ενεργειακών έργων. Η συνεχής ανάπτυξη νέων υβριδικών προσεγγίσεων και η ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών αναμένεται να ενισχύσουν ακόμη περισσότερο τον ρόλο της MCDM στον σχεδιασμό βιώσιμων ενεργειακών συστημάτων κατά τις επόμενες δεκαετίες.

2.2 Μέθοδος AHP και Fuzzy AHP

2.2.1 Θεωρητική Θεμελίωση της AHP

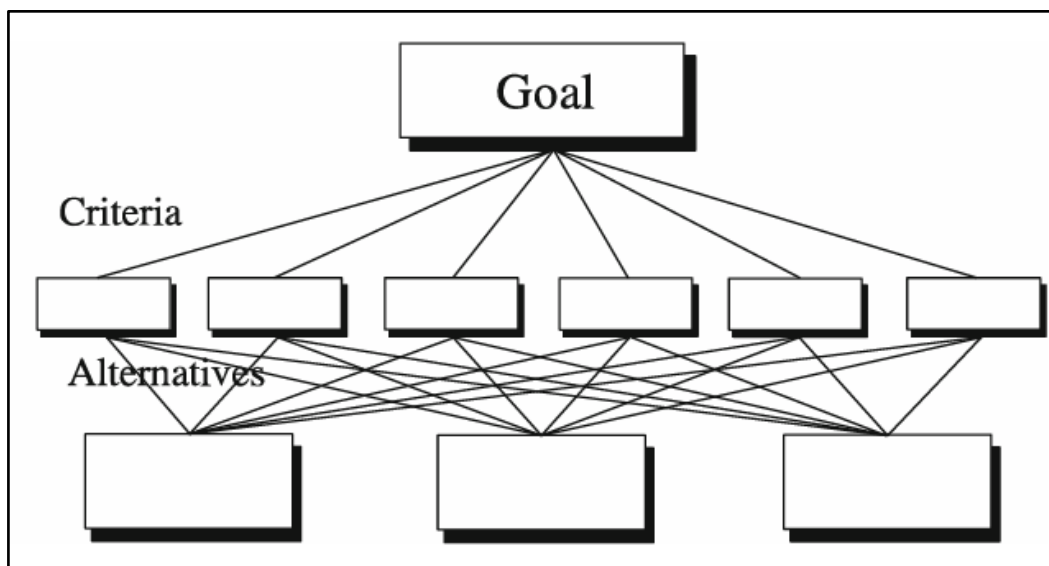
Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process – AHP) αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες και ευρέως εφαρμοζόμενες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Thomas Saaty στα τέλη της δεκαετίας του 1970 με στόχο την υποστήριξη σύνθετων προβλημάτων λήψης αποφάσεων που περιλαμβάνουν πολλαπλά, συχνά αντικρουόμενα, κριτήρια. Η βασική φιλοσοφία της AHP στηρίζεται στη διάσπαση ενός σύνθετου προβλήματος σε μία ιεραρχική δομή αποτελούμενη από τον γενικό στόχο, τα κριτήρια, τα υποκριτήρια και τις εναλλακτικές λύσεις, επιτρέποντας τη συστηματική αξιολόγηση κάθε επιπέδου χωριστά (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Η διαδικασία εφαρμογής της AHP βασίζεται στις συγκρίσεις ανά ζεύγη (pairwise comparisons), μέσω των οποίων ο αποφασίζων εκφράζει ποιο στοιχείο είναι σημαντικότερο

σε σχέση με ένα άλλο και σε ποιο βαθμό. Οι συγκρίσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας την κλίμακα σχετικής σημασίας του Saaty από το 1 έως το 9, όπου η τιμή 1 υποδηλώνει ισοδυναμία και η τιμή 9 απόλυτη υπεροχή ενός στοιχείου έναντι ενός άλλου. Από τους πίνακες συγκρίσεων προκύπτουν τα διανύσματα προτεραιοτήτων (priority vectors), τα οποία εκφράζουν τα τελικά βάρη των κριτηρίων (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της AHP είναι η δυνατότητα συνδυασμού ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης. Επιπλέον, η μέθοδος επιτρέπει τον έλεγχο της λογικής συνέπειας των κρίσεων μέσω του Δείκτη Συνέπειας (Consistency Index – CI) και του Λόγου Συνέπειας (Consistency Ratio – CR). Σύμφωνα με τον Saaty (2008), τιμές του CR μικρότερες από 0,10 θεωρούνται αποδεκτές και υποδηλώνουν ικανοποιητική συνοχή στις κρίσεις των εμπειρογνομόνων.

Η θεωρητική βάση της AHP ενισχύθηκε περαιτέρω από τους Saaty & Vargas, (2012), οι οποίοι διατύπωσαν τα θεμελιώδη αξιώματα της μεθόδου και ανέδειξαν τη δυνατότητα γενίκευσής της μέσω του Analytic Network Process (ANP). Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η AHP αποτελεί μία θεωρία μέτρησης άυλων και ποιοτικών παραγόντων μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε ιεραρχικές δομές όσο και σε πιο σύνθετα δίκτυα αλληλεξαρτήσεων.



Εικόνα 3. Βασική ιεραρχική δομή της μεθόδου AHP (Στόχος – Κριτήρια – Υποκριτήρια – Εναλλακτικές λύσεις).

2.2.2 Περιορισμοί της Κλασικής AHP

Παρά τη μεγάλη διάδοσή της, η AHP παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς που σχετίζονται κυρίως με την υποκειμενικότητα των συγκρίσεων. Στην πράξη, οι ειδικοί συχνά δυσκολεύονται να εκφράσουν με ακρίβεια τις προτιμήσεις τους χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές. Οι κρίσεις τους χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, ασάφεια και γλωσσικές εκφράσεις όπως «ελαφρώς σημαντικότερο» ή «πολύ σημαντικότερο», οι οποίες δεν μπορούν πάντοτε να αποτυπωθούν επακριβώς σε έναν αριθμό (Al-Aziz et al., 2020).

Σύμφωνα με τους Al-Aziz et al. (2020), όταν οι συγκρίσεις βασίζονται σε μη συνεπή ή ασαφή δεδομένα, τα αποτελέσματα της κλασικής AHP ενδέχεται να παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις πραγματικές προτιμήσεις των εμπλεκομένων. Η δυσκολία αυτή καθίσταται ακόμη πιο έντονη σε προβλήματα στρατηγικού σχεδιασμού και χωροθέτησης έργων ΑΠΕ, όπου συμμετέχουν πολλοί εμπειρογνώμονες με διαφορετικές αντιλήψεις και επίπεδα γνώσης.

Η ανάγκη αντιμετώπισης της αβεβαιότητας και της ασάφειας οδήγησε στην ανάπτυξη της Fuzzy AHP, η οποία συνδυάζει την κλασική AHP με τη θεωρία των ασαφών συνόλων (Fuzzy Sets Theory).

2.2.3 Ανάπτυξη της Fuzzy AHP

Η θεωρία των ασαφών συνόλων εισήχθη από τον Zadeh το 1965 και προσέφερε τη δυνατότητα αναπαράστασης αβέβαιων ή λεκτικών πληροφοριών με μαθηματικό τρόπο. Βασιζόμενος σε αυτή τη θεωρία, ο Buckley (1985) ανέπτυξε την πρώτη ολοκληρωμένη εκδοχή της Fuzzy AHP, επιτρέποντας στους ειδικούς να εκφράζουν τις προτιμήσεις τους μέσω ασαφών αριθμών αντί για ακριβείς τιμές.

Στη Fuzzy AHP οι συγκρίσεις ανά ζεύγη εκφράζονται συνήθως με τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς (Triangular Fuzzy Numbers – TFNs), οι οποίοι περιγράφουν ένα εύρος πιθανών τιμών αντί μίας μοναδικής τιμής. Με τον τρόπο αυτό η μέθοδος μπορεί να αποτυπώσει αποτελεσματικότερα την ανθρώπινη σκέψη και την αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις κρίσεις των ειδικών. Όπως αναφέρει ο Buckley (1985), οι ασαφείς λόγοι επιτρέπουν την αναπαράσταση εκφράσεων όπως «περίπου 5 φορές σημαντικότερο» ή «μεταξύ 4 και 6 φορές σημαντικότερο», οι οποίες είναι πιο κοντά στον πραγματικό τρόπο λήψης αποφάσεων.

Σημαντική εξέλιξη της μεθόδου αποτέλεσε η εργασία του Chang (1996), ο οποίος πρότεινε τη μέθοδο Extent Analysis για τον υπολογισμό των ασαφών βαρών. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη χρήση τριγωνικών ασαφών αριθμών και στην εξαγωγή συνθετικών βαθμών προτεραιότητας, αποτελώντας μέχρι σήμερα την πιο διαδεδομένη μαθηματική διαδικασία εφαρμογής της Fuzzy AHP.

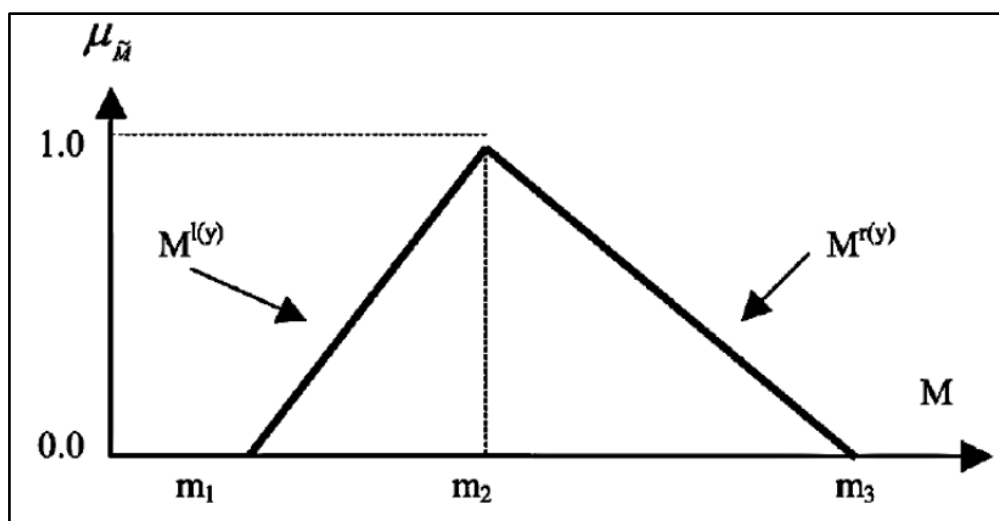
Το Σχήμα 2.5 απεικονίζει έναν τριγωνικό ασαφή αριθμό (Triangular Fuzzy Number – TFN), ο οποίος αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές αναπαράστασης της αβεβαιότητας στη μέθοδο Fuzzy AHP. Ένας τριγωνικός ασαφής αριθμός ορίζεται από τρεις παραμέτρους, τις m_1 , m_2 και m_3 , οι οποίες περιγράφουν το εύρος των πιθανών τιμών μιας μεταβλητής. Ειδικότερα, η παράμετρος m_1 αντιστοιχεί στην ελάχιστη δυνατή τιμή, η παράμετρος m_2 εκφράζει την πιθανότερη ή περισσότερη αντιπροσωπευτική τιμή, ενώ η παράμετρος m_3 αντιπροσωπεύει τη μέγιστη δυνατή τιμή του ασαφούς αριθμού (Koozbanani et al., 2018).

Η γραφική παράσταση του TFN έχει τριγωνική μορφή, με τη συνάρτηση συμμετοχής να αυξάνεται γραμμικά από το m_1 έως το m_2 , όπου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της ίση με 1, και στη συνέχεια να μειώνεται γραμμικά από το m_2 έως το m_3 . Με τον τρόπο αυτό αποτυπώνεται όχι μόνο η επικρατέστερη εκτίμηση ενός μεγέθους, αλλά και το εύρος αβεβαιότητας που τη συνοδεύει. Η χρήση τριγωνικών ασαφών αριθμών επιτρέπει την καλύτερη αναπαράσταση των ανθρώπινων κρίσεων και προτιμήσεων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι αποφασίζοντες δυσκολεύονται να εκφράσουν τις εκτιμήσεις τους με ακριβείς αριθμητικές τιμές (Koozbanani et al., 2018).

$$\mu(x | M) = \begin{cases} 0; & x < m_1 \\ (x - m_1) / (m_2 - m_1) & m_1 \leq x \leq m_2 \\ (m_3 - x) / (m_3 - m_2) & m_2 \leq x \leq m_3 \\ 0; & x > m_3 \end{cases}$$

Koozbanani et al., 2018

Η μαθηματική περιγραφή της συνάρτησης συμμετοχής βασίζεται σε δύο γραμμικά τμήματα, ένα αύξον και ένα φθίνον, τα οποία ορίζουν τον βαθμό συμμετοχής κάθε τιμής στο ασαφές σύνολο. Η προσέγγιση αυτή καθιστά τους τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς ιδιαίτερα εύχρηστους σε εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης, καθώς συνδυάζουν απλότητα υπολογισμών με αποτελεσματική διαχείριση της αβεβαιότητας και της ασάφειας που χαρακτηρίζει τις κρίσεις των ειδικών.



Εικόνα 4. Αναπαράσταση τριγωνικού ασαφούς αριθμού (Triangular Fuzzy Number – TFN). Πηγή: Koohbanani et al., 2018

2.2.4 Σύγχρονες Εφαρμογές της Fuzzy AHP

Κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η Fuzzy AHP έχει καθιερωθεί ως μία από τις σημαντικότερες μεθόδους υποστήριξης αποφάσεων στον ενεργειακό σχεδιασμό. Οι Kaya & Kahraman (2010) εφάρμοσαν μία ολοκληρωμένη προσέγγιση Fuzzy AHP–VIKOR για την επιλογή βέλτιστων ενεργειακών πολιτικών και θέσεων εγκατάστασης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην περιοχή της Κωνσταντινούπολης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής επιτρέπει την αποτελεσματικότερη διαχείριση των αβέβαιων και ποιοτικών παραγόντων που χαρακτηρίζουν τον ενεργειακό σχεδιασμό.

Αντίστοιχα, οι Heo et al. (2010) χρησιμοποίησαν τη Fuzzy AHP για την αξιολόγηση προγραμμάτων διάδοσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη Νότια Κορέα. Η ανάλυσή τους ανέδειξε τη σημασία οικονομικών, τεχνολογικών, περιβαλλοντικών και πολιτικών παραγόντων, αποδεικνύοντας ότι η μέθοδος μπορεί να ενσωματώσει πολλαπλές και συχνά αντικρουόμενες διαστάσεις λήψης αποφάσεων.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενη χρήση υβριδικών μοντέλων, στα οποία η Fuzzy AHP χρησιμοποιείται για τη στάθμιση των κριτηρίων και στη συνέχεια συνδυάζεται με τεχνικές κατάταξης εναλλακτικών λύσεων, όπως οι TOPSIS και VIKOR. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν την ολοκληρωμένη αξιολόγηση πολλών εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών και τη λήψη πιο αξιόπιστων αποφάσεων σε σύνθετα χωρικά προβλήματα (Kaya & Kahraman, 2010· Taylan et al., 2020). Οι Taylan et al. (2020) συνδύασαν τη Fuzzy AHP με τις μεθόδους VIKOR και TOPSIS για την

αξιολόγηση εναλλακτικών ενεργειακών συστημάτων στη Σαουδική Αραβία. Η έρευνα κατέδειξε ότι η Fuzzy AHP αποτελεί αποτελεσματικό εργαλείο προσδιορισμού βαρών κριτηρίων, ενώ η συνδυαστική χρήση πολλαπλών τεχνικών βελτιώνει την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων.

Μέθοδος	Διαχείριση Αβεβαιότητας	Απαιτήσεις Δεδομένων	Υπολογιστική Πολυπλοκότητα	Κόρες Εφαρμογές στις ΑΠΕ	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
AHP	Χαμηλή	Ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα	Χαμηλή	Χωροθέτηση Φ/Β, αιολικών πάρκων, αξιολόγηση ενεργειακών τεχνολογιών	Απλή εφαρμογή, εύκολη ερμηνεία, έλεγχος συνέπειας (CR)	Ευαισθησία στην υποκειμενικότητα των ειδικών
Fuzzy AHP	Υψηλή	Ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα με ασαφείς κρίσεις	Μέτρια	Χωροθέτηση έργων ΑΠΕ, ενεργειακός σχεδιασμός, επιλογή τεχνολογιών	Διαχειρίζεται ασάφεια και αβεβαιότητα στις ανθρώπινες κρίσεις	Μεγαλύτερη υπολογιστική διαδικασία
Fuzzy AHP–TOPSIS	Πολύ υψηλή	Σταθμισμένα κριτήρια και εναλλακτικές λύσεις	Υψηλή	Επιλογή βέλτιστης θέσης Φ/Β, αιολικών και υβριδικών συστημάτων	Κατάταξη εναλλακτικών με βάση την ιδανική και αντι-ιδανική λύση	Ευαισθησία στη διαδικασία κανονικοποίησης
Fuzzy AHP–VIKOR	Πολύ υψηλή	Σταθμισμένα κριτήρια και εναλλακτικές λύσεις	Υψηλή	Ενεργειακός σχεδιασμός, επιλογή επενδύσεων ΑΠΕ, αξιολόγηση τεχνολογιών	Εντοπισμός συμβιβαστικής λύσης μεταξύ αντικρουόμενων κριτηρίων	Πιο σύνθετη ερμηνεία αποτελεσμάτων

Πίνακας 1. Σύγκριση των μεθόδων AHP, Fuzzy AHP, Fuzzy AHP–TOPSIS και Fuzzy AHP–VIKOR.

Πηγή: Προσαρμογή από Kaya & Kahraman (2010), Heo et al. (2010), Taylan et al. (2020) , Luhaniwal et al. (2025), Tamtam & Tourabi (2025).

2.2.5 Η Fuzzy AHP στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η εφαρμογή της Fuzzy AHP στις ΑΠΕ έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάγκης αξιολόγησης σύνθετων τεχνικών, οικονομικών, κοινωνικών και

περιβαλλοντικών παραμέτρων. Οι Luhaniwal et al. (2025) χρησιμοποίησαν συνδυασμό DEA και Fuzzy AHP για την ιεράρχηση διαφορετικών τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ινδία, λαμβάνοντας υπόψη τέσσερις βασικές κατηγορίες κριτηρίων: τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικοπολιτικά. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η μέθοδος παρέχει σταθερά και αξιόπιστα αποτελέσματα ακόμη και σε σύνθετα προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού.

Παρόμοια, οι Tamtam και Tourabi (2025) πρότειναν ένα υβριδικό πλαίσιο Fuzzy AHP–GRA για τη στρατηγική αξιολόγηση τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας, υπογραμμίζοντας τη δυνατότητα της Fuzzy AHP να λειτουργεί ως μηχανισμός υπολογισμού βαρών πριν από την τελική κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών.

Τέλος, οι Akusta & Cergibozan (2024) αξιολόγησαν πέντε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με βάση 30 επιμέρους κριτήρια και διαπίστωσαν ότι τα οικονομικά και πολιτικά κριτήρια αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες για τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων.

2.2.6 Fuzzy AHP και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS)

Η ενσωμάτωση της μεθόδου Fuzzy AHP με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) αποτελεί σήμερα μία από τις πιο διαδεδομένες και αποτελεσματικές προσεγγίσεις για την επίλυση σύνθετων χωρικών προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Η ανάγκη συνδυασμού των δύο εργαλείων προέκυψε από το γεγονός ότι η αξιολόγηση της καταλληλότητας μιας περιοχής για την εγκατάσταση έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν εξαρτάται μόνο από αριθμητικά δεδομένα, αλλά και από τη χωρική κατανομή πολλών παραγόντων που συχνά χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα και υποκειμενικότητα (Malczewski, 2006).

Τα GIS παρέχουν τη δυνατότητα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απεικόνισης μεγάλου όγκου χωρικών δεδομένων, όπως η μορφολογία του εδάφους, η χρήση γης, το οδικό δίκτυο, τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι προστατευόμενες περιοχές και η ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, τα GIS από μόνα τους δεν μπορούν να αποδώσουν τη σχετική σημαντικότητα των διαφόρων παραμέτρων. Για τον λόγο αυτό, οι πολυκριτηριακές μέθοδοι και ειδικότερα η Fuzzy AHP χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά ώστε να υπολογιστούν τα βάρη των κριτηρίων και να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις κρίσεις των ειδικών (Saaty, 2008; Buckley, 1985).

Η βασική φιλοσοφία του συνδυασμού GIS και Fuzzy AHP στηρίζεται στη μετατροπή κάθε χωρικού κριτηρίου σε θεματικό επίπεδο πληροφορίας (thematic layer). Στη συνέχεια, κάθε επίπεδο κανονικοποιείται μέσω ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής, ώστε οι τιμές του να εκφράζουν βαθμούς καταλληλότητας από 0 έως 1. Έπειτα εφαρμόζεται η Fuzzy AHP για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη και τελικά πραγματοποιείται η σύνθεση όλων των επιπέδων σε έναν ενιαίο χάρτη καταλληλότητας (Malczewski, 200; Koohbanani et al., 2018).

Η χρήση ασαφών συνόλων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική στις χωρικές εφαρμογές, επειδή τα περισσότερα γεωγραφικά φαινόμενα δεν χαρακτηρίζονται από απόλυτα όρια. Για παράδειγμα, στην αξιολόγηση της κλίσης του εδάφους για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών δεν υπάρχει ένα ακριβές όριο πέρα από το οποίο μια περιοχή θεωρείται ακατάλληλη. Αντίθετα, η καταλληλότητα μειώνεται σταδιακά όσο αυξάνεται η κλίση. Η Fuzzy Logic επιτρέπει την αναπαράσταση αυτής της σταδιακής μετάβασης μέσω συναρτήσεων συμμετοχής, αποδίδοντας μεγαλύτερο ρεαλισμό στα αποτελέσματα σε σχέση με τις κλασικές δυαδικές προσεγγίσεις (Buckley, 1985; Chang, 1996).

Οι Koohbanani et al. (2018) εφάρμοσαν ένα GIS-based Fuzzy AHP μοντέλο για την επιλογή κατάλληλων θέσεων κατασκευής υπόγειων φραγμάτων σε ημιξηρες περιοχές. Οι συγγραφείς απέδειξαν ότι η χρήση ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής βελτίωσε σημαντικά την ακρίβεια των χαρτών καταλληλότητας, καθώς επέτρεψε την αποτελεσματικότερη διαχείριση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά δεδομένα. Αντίστοιχα, οι Charabi & Gastli (2011) αξιοποίησαν GIS και Fuzzy Multi-Criteria Evaluation για την επιλογή κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων στο Ομάν, καταλήγοντας ότι η ενσωμάτωση ασαφούς λογικής προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κλασικές πολυκριτηριακές τεχνικές.

Η εφαρμογή της Fuzzy AHP σε συνδυασμό με GIS έχει γνωρίσει ιδιαίτερη ανάπτυξη στον τομέα της ηλιακής ενέργειας. Οι Sánchez-Lozano et al. (2013) συνδύασαν GIS, Fuzzy AHP και Fuzzy TOPSIS για τον εντοπισμό κατάλληλων περιοχών εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών στη νοτιοανατολική Ισπανία. Η μελέτη κατέδειξε ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να ενσωματώσει αποτελεσματικά τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, παράγοντας αξιόπιστους χάρτες καταλληλότητας. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσίασαν οι Tahri et al. (2015) στο Μαρόκο, όπου η χρήση

GIS–Fuzzy AHP επέτρεψε την ταυτόχρονη αξιολόγηση δεκάδων χωρικών παραμέτρων, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο και το κόστος ανάλυσης.

Τα τελευταία χρόνια, η βιβλιογραφία παρουσιάζει σαφή στροφή προς υβριδικά μοντέλα GIS–Fuzzy AHP για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Οι Almasad et al. (2023) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης καταλληλότητας φωτοβολταϊκών πάρκων συνδυάζοντας GIS, Fuzzy Logic και πολυκριτηριακή ανάλυση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες ήταν η ηλιακή ακτινοβολία, η απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί. Αντίστοιχα, οι Oladosu et al. (2025) χρησιμοποίησαν υβριδικό GIS–Fuzzy AHP μοντέλο για την επιλογή θέσεων ηλιακών πάρκων, επιβεβαιώνοντας ότι η ασαφής προσέγγιση παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία σε περιπτώσεις όπου οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι ελλιπείς ή αβέβαιες.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι πλέον πρόσφατες έρευνες. Οι Yilmaz et al. (2024) αξιοποίησαν GIS και Fuzzy AHP για τη χωροθέτηση ηλιακών σταθμών στην Τουρκία και διαπίστωσαν ότι η μέθοδος επιτρέπει την ακριβέστερη απεικόνιση των χωρικών διαφοροποιήσεων της καταλληλότητας. Παράλληλα, η μελέτη των Paula (2025) ανέδειξε τις δυνατότητες των σύγχρονων GIS-based Fuzzy AHP frameworks στη δημιουργία δυναμικών χαρτών καταλληλότητας, οι οποίοι μπορούν να ενημερώνονται αυτόματα καθώς μεταβάλλονται τα δεδομένα εισόδου.

2.3 Συνδυασμός Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (MCDM) και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS)

2.3.1 Θεωρητική Θεμελίωση του GIS-MCDA

Η συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των χωρικών προβλημάτων σχεδιασμού και διαχείρισης φυσικών πόρων οδήγησε στην ανάπτυξη προσεγγίσεων που συνδυάζουν τη δύναμη των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) με τις μεθόδους Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDM/MCDA). Η σύζευξη αυτών των δύο επιστημονικών πεδίων δημιούργησε το γνωστό πλέον πλαίσιο GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis (GIS-MCDA), το οποίο αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία υποστήριξης χωρικών αποφάσεων.

Σύμφωνα με τον Malczewski (2006), τα χωρικά προβλήματα λήψης αποφάσεων χαρακτηρίζονται συνήθως από μεγάλο αριθμό εναλλακτικών επιλογών, πολλαπλά και

συχνά αντικρουόμενα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς και από την εμπλοκή διαφορετικών ομάδων ενδιαφερομένων μερών με διαφορετικές προτιμήσεις και επιδιώξεις. Στο πλαίσιο αυτό, η ενσωμάτωση των GIS με την πολυκριτηριακή ανάλυση επιτρέπει τον συνδυασμό γεωγραφικών δεδομένων και αξιολογικών κρίσεων, με στόχο την παραγωγή πληροφοριών που υποστηρίζουν αποτελεσματικά τη λήψη αποφάσεων. Ο ίδιος συγγραφέας, μέσα από ανασκόπηση περισσότερων από 300 δημοσιεύσεων, ανέδειξε το GIS-MCDA ως ένα από τα ταχύτερα αναπτυσσόμενα πεδία της χωρικής ανάλυσης, επισημαίνοντας ότι η συνέργεια GIS και MCDA προσφέρει σημαντικά θεωρητικά και πρακτικά οφέλη (Malczewski, 2006).

Τα GIS προσφέρουν τη δυνατότητα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και οπτικοποίησης μεγάλου όγκου χωρικών δεδομένων, ενώ οι μέθοδοι MCDM παρέχουν το θεωρητικό πλαίσιο για την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων με βάση πολλαπλά κριτήρια. Ο συνδυασμός τους επιτρέπει όχι μόνο την ανάλυση των χωρικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής αλλά και την ποσοτικοποίηση των προτιμήσεων των αποφασιζόντων, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον υποστήριξης αποφάσεων (Greene et al., 2011).

Οι Greene et al. (2011) επισημαίνουν ότι οι μέθοδοι GIS-MCDA βοηθούν στη δομημένη ανάλυση σύνθετων προβλημάτων μέσω της επιλογής κατάλληλων κριτηρίων, της στάθμισής τους και της αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων. Παράλληλα, παρέχουν τη δυνατότητα τεκμηρίωσης των αποφάσεων και διαφάνειας στη διαδικασία αξιολόγησης, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις όπου εμπλέκονται πολλοί φορείς ή κοινωνικές ομάδες.

Η εικόνα 5 παρουσιάζει το εννοιολογικό πλαίσιο ενσωμάτωσης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) με την Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) για την υποστήριξη χωρικών αποφάσεων. Αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά διαγράμματα της φιλοσοφίας GIS–MCDA και απεικονίζει τη ροή των δεδομένων και της γνώσης από τη συλλογή πληροφοριών έως τη λήψη της τελικής απόφασης (Ryan & Nimick, 2019).

Στο αριστερό τμήμα του σχήματος εμφανίζονται οι λήπτες αποφάσεων (Decision Makers) και οι ειδικοί του αντικειμένου (Field Experts). Οι ομάδες αυτές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς προσδιορίζουν τους στόχους της ανάλυσης, επιλέγουν τα κατάλληλα κριτήρια αξιολόγησης και εκφράζουν τις προτιμήσεις τους σχετικά με τη

σημασία κάθε παραμέτρου. Η συμμετοχή τους είναι απαραίτητη ώστε το μοντέλο να αντανακλά τις πραγματικές ανάγκες και προτεραιότητες του προβλήματος.

Η διαδικασία ξεκινά από τον πραγματικό κόσμο (Real World), δηλαδή το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον όπου εντοπίζεται το πρόβλημα λήψης απόφασης. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, ο πραγματικός κόσμος αντιστοιχεί στην περιοχή μελέτης και στα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών, όπως το ανάγλυφο, η ηλιακή ακτινοβολία, το οδικό δίκτυο, οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι χρήσεις γης και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί (Ryan & Nimick, 2019).

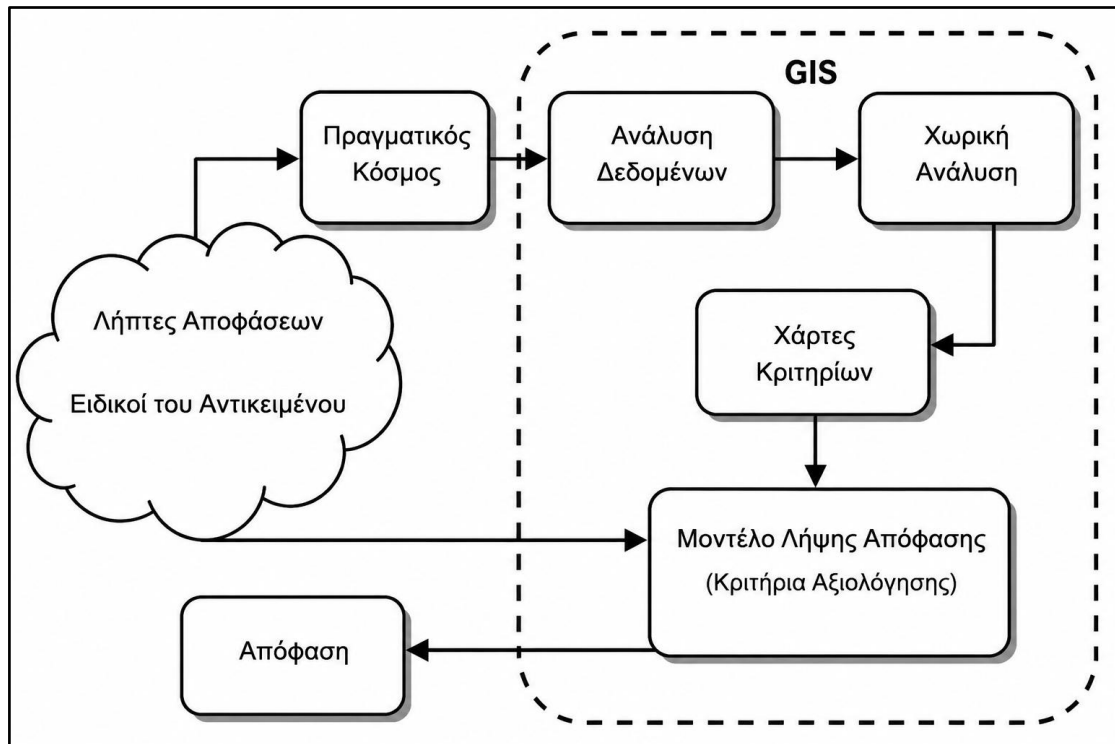
Στη συνέχεια, τα δεδομένα του πραγματικού κόσμου εισάγονται στο περιβάλλον των GIS, όπου πραγματοποιείται αρχικά η ανάλυση δεδομένων (Data Analysis). Στο στάδιο αυτό γίνεται η συλλογή, επεξεργασία και οργάνωση των γεωχωρικών πληροφοριών σε κατάλληλη μορφή. Ακολουθεί η χωρική ανάλυση (Spatial Analysis), κατά την οποία εφαρμόζονται γεωγραφικές λειτουργίες, όπως υπολογισμός αποστάσεων, ανάλυση κλίσεων, επεξεργασία ψηφιακών μοντέλων εδάφους, δημιουργία ζωνών επιρροής (buffers) και χωρικές επικαλύψεις (overlay analysis) (Ryan & Nimick, 2019).

Αποτέλεσμα της χωρικής ανάλυσης είναι η παραγωγή των χαρτών κριτηρίων (Criteria Maps). Κάθε χάρτης αναπαριστά ένα επιμέρους κριτήριο που επηρεάζει τη λήψη απόφασης. Για παράδειγμα, στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών μπορεί να δημιουργηθούν ξεχωριστοί χάρτες για την κλίση του εδάφους, τον προσανατολισμό, την ηλιακή ακτινοβολία, την απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς, την απόσταση από οδικές υποδομές και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς (Ryan & Nimick, 2019).

Οι χάρτες αυτοί αποτελούν τις εισόδους του μοντέλου λήψης αποφάσεων (Decision Model). Το μοντέλο ενσωματώνει τα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς και τις προτιμήσεις των ειδικών και των ληπτών αποφάσεων. Σε αυτό το στάδιο εφαρμόζονται οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπως η AHP, η Fuzzy AHP, η TOPSIS ή άλλες τεχνικές στάθμισης και συνδυασμού των κριτηρίων. Μέσω της διαδικασίας αυτής υπολογίζεται ένας συνολικός δείκτης καταλληλότητας για κάθε χωρική μονάδα της περιοχής μελέτης (Ryan & Nimick, 2019).

Τέλος, το αποτέλεσμα του μοντέλου οδηγεί στην τελική απόφαση (Decision), η οποία μπορεί να αφορά την επιλογή της καταλληλότερης θέσης εγκατάστασης, την κατάταξη

εναλλακτικών περιοχών ή την παραγωγή ενός χάρτη καταλληλότητας. Η διαδικασία δεν είναι γραμμική αλλά αλληλεπιδραστική, καθώς οι λήπτες αποφάσεων μπορούν να αναθεωρούν τα κριτήρια ή τα βάρη τους και να επαναλαμβάνουν την ανάλυση μέχρι να επιτευχθεί ένα αποδεκτό αποτέλεσμα.



Εικόνα 5. Εννοιολογικό πλαίσιο ενσωμάτωσης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) για τη λήψη χωρικών αποφάσεων. Πηγή: Τροποποίηση μετά από Ryan & Nimick, 2019

2.3.2 Γιατί συνδυάζονται GIS και MCDM

Η ανάγκη συνδυασμού GIS και MCDM προκύπτει από το γεγονός ότι τα περισσότερα προβλήματα χωροθέτησης δεν μπορούν να επιλυθούν μόνο με γεωγραφική ανάλυση ή μόνο με μαθηματικές μεθόδους αξιολόγησης. Η επιλογή κατάλληλων περιοχών για την εγκατάσταση ενεργειακών έργων, η προστασία φυσικών πόρων, ο χωροταξικός σχεδιασμός και η περιβαλλοντική διαχείριση απαιτούν ταυτόχρονα χωρική πληροφορία και αξιολόγηση πολλαπλών παραγόντων.

Οι Malczewski & Rinner (2015) ορίζουν το GIS-MCDA ως ένα σύνολο μεθόδων που μετατρέπουν γεωγραφικά δεδομένα και αξιολογικές κρίσεις σε χρήσιμη πληροφορία για τη λήψη χωρικών αποφάσεων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, τα GIS επιτρέπουν την απεικόνιση και ανάλυση των χωρικών σχέσεων, ενώ οι μέθοδοι MCDA εισάγουν

μηχανισμούς στάθμισης και ιεράρχησης των κριτηρίων, επιτρέποντας τη σύγκριση εναλλακτικών επιλογών σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης.

Η συνέργεια αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στις εφαρμογές χωρικής καταλληλότητας (Suitability Analysis), όπου απαιτείται η αξιολόγηση μεγάλου αριθμού γεωγραφικών παραμέτρων με διαφορετική σχετική σημασία. Μέσω των GIS μπορούν να δημιουργηθούν θεματικά επίπεδα πληροφορίας (layers), ενώ μέσω της MCDM καθορίζεται η σχετική βαρύτητα κάθε παράγοντα και υπολογίζεται ο τελικός δείκτης καταλληλότητας.

Οι Sisman & Aydinoglu (2020) υποστηρίζουν ότι τα GIS-MCDA βελτιώνουν σημαντικά τις σύνθετες χωρικές διαδικασίες λήψης αποφάσεων, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης αξιολόγησης μεγάλου αριθμού τεχνικών, οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Επιπλέον, η ενσωμάτωση πολλών επιπέδων πληροφορίας σε ένα ενιαίο μοντέλο επιτρέπει την ανάπτυξη πιο αντικειμενικών και τεκμηριωμένων αποφάσεων.

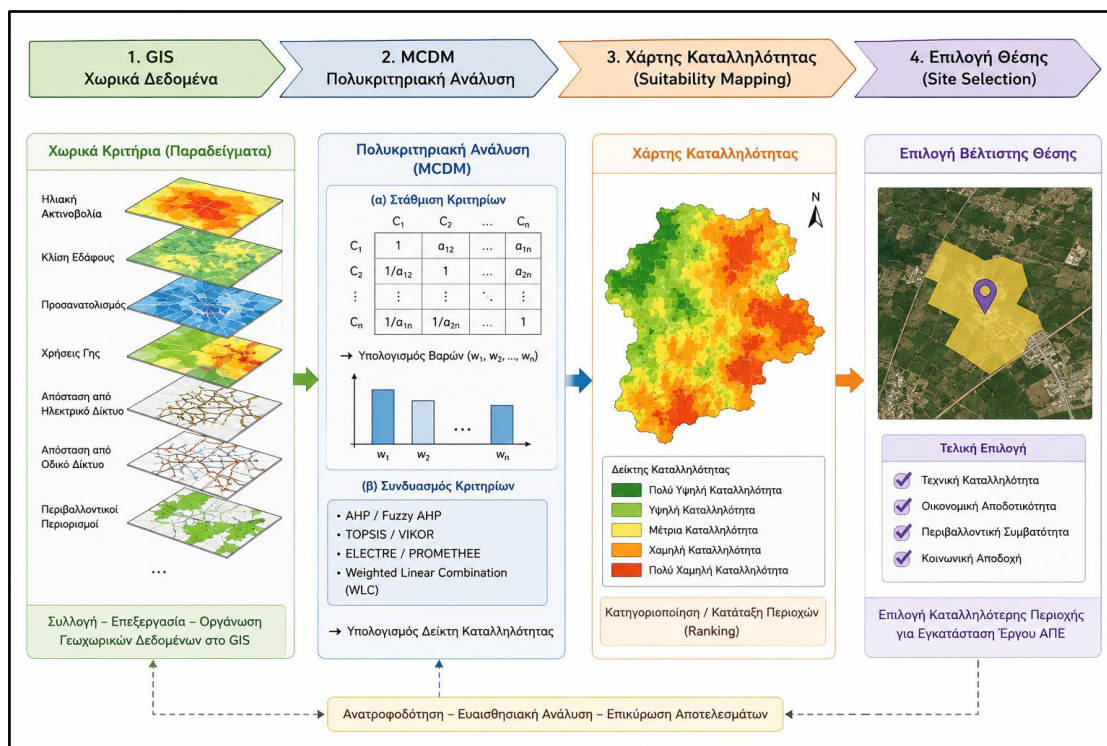
2.3.3 GIS-MCDM στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η εφαρμογή του GIS-MCDM στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) έχει αυξηθεί εντυπωσιακά κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Η ανάγκη επιλογής κατάλληλων περιοχών εγκατάστασης ενεργειακών υποδομών, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς περιορισμούς, καθιστά τη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων σχεδόν απαραίτητη.

Οι Shao et al. (2020), μέσα από ανασκόπηση 85 μελετών χωροθέτησης ενεργειακών έργων, διαπίστωσαν ότι ο συνδυασμός GIS με AHP αποτελεί τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη προσέγγιση, ενώ ακολουθούν οι τεχνικές GIS–Fuzzy AHP, GIS–TOPSIS και GIS–VIKOR. Οι εφαρμογές αφορούν κυρίως φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά πάρκα, έργα βιομάζας και υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

Αντίστοιχα, οι Rahman et al. (2022) επισημαίνουν ότι η GIS-MCDM προσέγγιση έχει εξελιχθεί στο κυρίαρχο εργαλείο χωροθέτησης έργων ΑΠΕ, καθώς επιτρέπει τη συνεκτίμηση μεγάλου αριθμού παραμέτρων και τη δημιουργία χαρτών καταλληλότητας υψηλής χωρικής ανάλυσης. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης διαφορετικών μεθόδων στάθμισης και αξιολόγησης καθιστά το GIS-MCDM ιδιαίτερα ευέλικτο για ενεργειακές εφαρμογές.

Οι σύγχρονες εφαρμογές δεν περιορίζονται πλέον μόνο στην εκτίμηση του ενεργειακού δυναμικού, αλλά εξετάζουν ταυτόχρονα ζητήματα ηλεκτρικής διασύνδεσης, περιβαλλοντικών επιπτώσεων, κοινωνικής αποδοχής και οικονομικής βιωσιμότητας, προσφέροντας μία περισσότερο ολιστική προσέγγιση στον ενεργειακό σχεδιασμό.



Εικόνα 6. Διαδικασία εφαρμογής GIS-MCDM για την αξιολόγηση καταλληλότητας και τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Πηγή: Ίδια επεξεργασία, βασισμένη στους Malczewski (2006), Malczewski & Rinner (2015), Shao et al. (2020), Zambrano-Asanza et al. (2021) και Almasad et al. (2023)

2.3.4 GIS-MCDM για Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών

Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα πεδία εφαρμογής του GIS-MCDM. Η επιλογή κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή απόδοση, το κόστος επένδυσης, τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου.

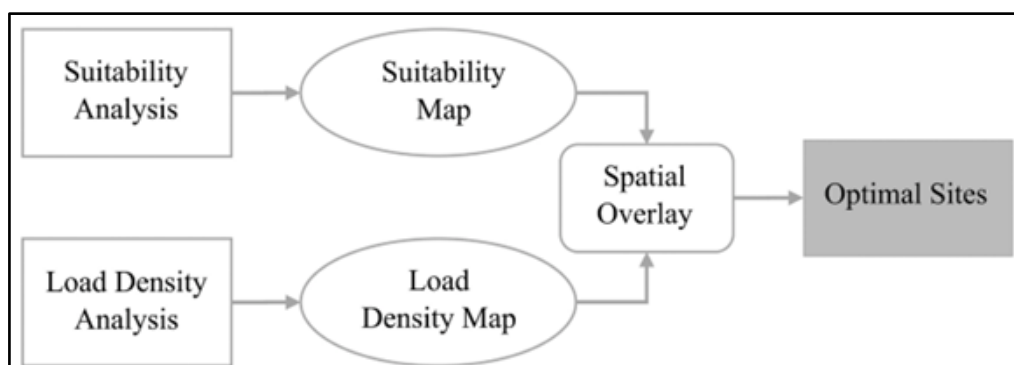
Μία από τις πρώτες ολοκληρωμένες εφαρμογές GIS-MCDM για φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάστηκε από τους Charabi & Gastli (2011), οι οποίοι χρησιμοποίησαν ασαφή πολυκριτηριακή ανάλυση (Spatial Fuzzy MCA) σε περιβάλλον GIS για τον εντοπισμό κατάλληλων περιοχών εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάρκων στο Ομάν. Οι συγγραφείς τόνισαν ότι η χρήση ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής επιτρέπει την καλύτερη

αναπαράσταση της αβεβαιότητας και των μεταβατικών ορίων μεταξύ κατάλληλων και ακατάλληλων περιοχών.

Στη συνέχεια, οι Sánchez-Lozano et al. (2013) συνδύασαν GIS με AHP και TOPSIS για την αξιολόγηση εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών μονάδων, αποδεικνύοντας ότι η πολυκριτηριακή προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερο τεκμηριωμένες και αντικειμενικές αποφάσεις.

Οι Tahri et al. (2015), εφαρμόζοντας GIS και AHP στη νότια περιοχή του Μαρόκου, αξιολόγησαν τέσσερις βασικές ομάδες κριτηρίων: κλιματικά χαρακτηριστικά, ανάγλυφο, χρήσεις γης και χωρική θέση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κλιματικό δυναμικό αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα επιλογής, ενώ ακολουθούν η κλίση του εδάφους και η προσβασιμότητα της περιοχής.

Σημαντική εξέλιξη αποτέλεσε η μελέτη των Zambrano-Asanza et al. (2021), οι οποίοι ενσωμάτωσαν για πρώτη φορά δεδομένα ηλεκτρικού φορτίου στη διαδικασία χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει όχι μόνο την επιλογή περιοχών με υψηλό ηλιακό δυναμικό αλλά και τη βελτιστοποίηση της ένταξης των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο διανομής, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική κατανομή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το διάγραμμα απεικονίζει μια διαδικασία λήψης χωρικών αποφάσεων στην οποία συνδυάζονται δύο διαφορετικές αναλύσεις. Η πρώτη αφορά την ανάλυση καταλληλότητας (Suitability Analysis), μέσω της οποίας αξιολογούνται τα φυσικά, τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά χαρακτηριστικά της περιοχής και παράγεται ένας χάρτης καταλληλότητας. Η δεύτερη αφορά την ανάλυση πυκνότητας φορτίου (Load Density Analysis), η οποία εξετάζει τη χωρική κατανομή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και παράγει αντίστοιχο χάρτη ενεργειακών αναγκών. Στη συνέχεια, οι δύο χάρτες συνδυάζονται μέσω χωρικής επικάλυψης (Spatial Overlay Analysis) ώστε να εντοπιστούν οι περιοχές που εμφανίζουν ταυτόχρονα υψηλή καταλληλότητα εγκατάστασης και αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών (Optimal Sites).



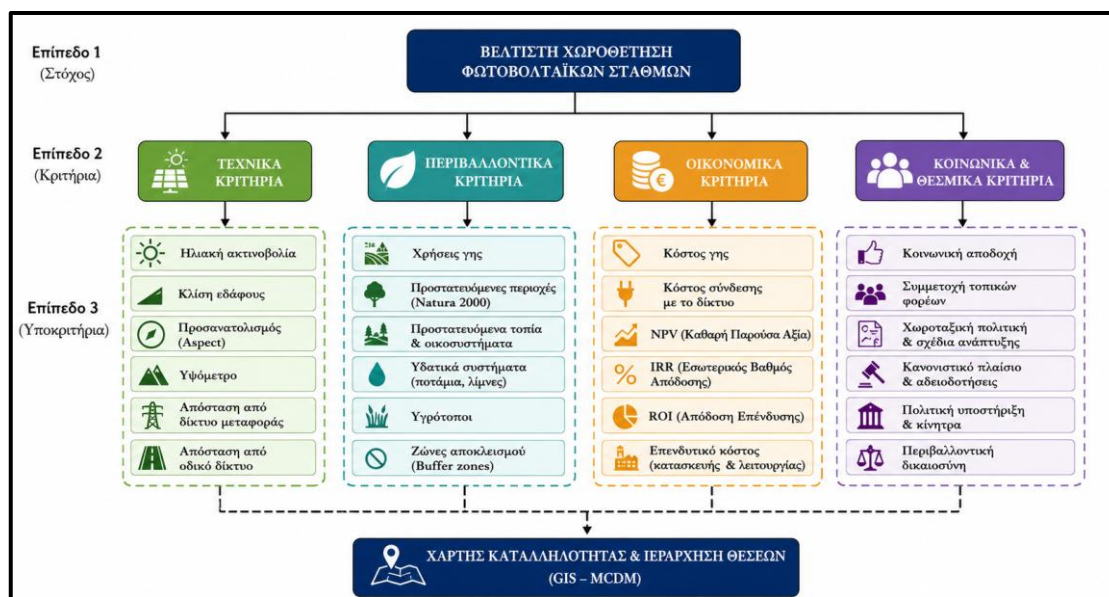
Εικόνα 7. Διαδικασία εντοπισμού βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω συνδυασμού ανάλυσης καταλληλότητας και ανάλυσης πυκνότητας ηλεκτρικού φορτίου. Πηγή: Zambrano-Asanza et al., 2021

Πιο πρόσφατες εφαρμογές, όπως αυτές των Almasad et al. (2023) και Yilmaz et al. (2024), αξιοποιούν συνδυασμούς GIS με Fuzzy AHP, επιτρέποντας την ταυτόχρονη διαχείριση χωρικών δεδομένων και αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις αξιολογήσεις ειδικών. Τα μοντέλα αυτά θεωρούνται σήμερα από τις πλέον αξιόπιστες προσεγγίσεις για την ανάπτυξη χαρτών καταλληλότητας φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

2.4 Κριτήρια Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών

Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία λήψης αποφάσεων, καθώς απαιτεί την ταυτόχρονη αξιολόγηση μεγάλου αριθμού τεχνικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών, κοινωνικών και θεσμικών παραμέτρων. Η επιλογή μιας κατάλληλης θέσης επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή απόδοση του έργου, το κόστος κατασκευής και λειτουργίας, την περιβαλλοντική συμβατότητα και τον βαθμό κοινωνικής αποδοχής. Για τον λόγο αυτό, η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναπτύξει πολυκριτηριακά μοντέλα χωροθέτησης τα οποία συνδυάζουν τεχνικές GIS και MCDM, επιτρέποντας τη συστηματική αξιολόγηση εναλλακτικών περιοχών εγκατάστασης φωτοβολταϊκών έργων (Ghasempour et al., 2019; Guaita-Pradas et al., 2019).

Σύμφωνα με τις σύγχρονες ανασκοπήσεις, τα κριτήρια χωροθέτησης μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικοθεσμικά κριτήρια. Η συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση εμφανίζεται με μικρές διαφοροποιήσεις στις περισσότερες εφαρμογές GIS-MCDM που αφορούν φωτοβολταϊκούς σταθμούς και θεωρείται πλέον η επικρατέστερη προσέγγιση στη διεθνή βιβλιογραφία (Guaita-Pradas et al., 2019; Deveci et al., 2021).



Εικόνα 8. Ιεραρχική ταξινόμηση των κριτηρίων χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών. Πηγή: ίδια επεξεργασία βασισμένο στους Ghasempour et al., 2019 και Guaita-Pradas et al., 2019).

2.4.1 Γενική Κατηγοριοποίηση Κριτηρίων Χωροθέτησης

Η επιλογή θέσης για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού σταθμού δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό, αλλά από ένα ευρύ σύνολο παραγόντων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι Ghasempour et al. (2019) επισημαίνουν ότι τα σημαντικότερα κριτήρια περιλαμβάνουν το ηλιακό δυναμικό, την προσβασιμότητα, την εγγύτητα στο ηλεκτρικό δίκτυο, το κόστος γης, τα λειτουργικά έξοδα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παράλληλα, η σημασία κάθε κριτηρίου διαφοροποιείται ανάλογα με τα γεωγραφικά, οικονομικά και θεσμικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

Αντίστοιχα, οι Guaita-Pradas et al. (2019), μελετώντας τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην Ισπανία, διαπίστωσαν ότι η βέλτιστη επιλογή προκύπτει από τον συνδυασμό τεχνικοοικονομικών, περιβαλλοντικών, κοινωνικών και πολιτικών κριτηρίων. Οι συγγραφείς υπογραμμίζουν ότι η αξιολόγηση των θέσεων δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στην ηλιακή ακτινοβολία, αλλά απαιτεί συνεκτίμηση των χρήσεων γης, της τοπογραφίας, της απόστασης από υποσταθμούς και οδικά δίκτυα, καθώς και των χωροταξικών περιορισμών.

2.4.2 Τεχνικά Κριτήρια Χωροθέτησης

Τα τεχνικά κριτήρια αποτελούν τη βασικότερη κατηγορία παραμέτρων κατά τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ενεργειακή απόδοση και τη λειτουργική βιωσιμότητα του έργου. Σχεδόν όλες οι εφαρμογές GIS-MCDM

χρησιμοποιούν ως κύρια τεχνικά κριτήρια την ηλιακή ακτινοβολία, την κλίση και τον προσανατολισμό του εδάφους, το υψόμετρο, την απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και την προσβασιμότητα μέσω του οδικού δικτύου (Zambrano-Asanza et al., 2021; Almasad et al., 2023; Yilmaz et al., 2024).

2.4.2.1 Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο χωροθέτησης, καθώς καθορίζει άμεσα την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Σύμφωνα με τους Zambrano-Asanza et al. (2021), οι περιοχές με υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση και μεγαλύτερη οικονομική βιωσιμότητα. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από τις μελέτες των Almasad et al. (2023) και Deveci et al. (2021), όπου η ηλιακή ακτινοβολία αναδείχθηκε ως το σημαντικότερο κριτήριο κατά την αξιολόγηση πιθανών θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών.

2.4.2.2 Κλίση Εδάφους

Η κλίση του εδάφους επηρεάζει τόσο την ενεργειακή απόδοση όσο και το κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Οι περιοχές με μικρές κλίσεις θεωρούνται καταλληλότερες, καθώς διευκολύνουν την εγκατάσταση των πάνελ, μειώνουν τις απαιτήσεις χωματουργικών εργασιών και περιορίζουν τις απώλειες λόγω σκίασης. Οι Charabi και Gastli (2011), Sánchez-Lozano et al. (2013) και Tahri et al. (2015) αναφέρουν ότι οι περισσότερες εφαρμογές θεωρούν βέλτιστες τις κλίσεις μικρότερες από 5°–10°.

2.4.2.3 Προσανατολισμός (Aspect)

Ο προσανατολισμός της επιφάνειας επηρεάζει τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο βόρειο ημισφαίριο, οι νότιες και νοτιοδυτικές εκθέσεις θεωρούνται γενικά οι πλέον κατάλληλες, καθώς δέχονται μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους. Οι Tahri et al. (2015) και Almasad et al. (2023) ενσωμάτωσαν το κριτήριο αυτό στα μοντέλα καταλληλότητας, διαπιστώνοντας σημαντική επίδραση στη συνολική βαθμολογία των θέσεων.

2.4.2.4 Απόσταση από Δίκτυο Μεταφοράς

Η εγγύτητα στις γραμμές μεταφοράς και στους υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την οικονομική βιωσιμότητα ενός έργου. Μεγάλες αποστάσεις συνεπάγονται αυξημένο κόστος σύνδεσης και μεγαλύτερες ενεργειακές

απώλειες κατά τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Zambrano-Asanza et al. (2021) και Al-Ali et al. (2024) περιλαμβάνουν την απόσταση από το δίκτυο ως ένα από τα σημαντικότερα τεχνικοοικονομικά κριτήρια χωροθέτησης.

2.4.2.5 Απόσταση από Οδικό Δίκτυο

Η προσβασιμότητα επηρεάζει το κόστος κατασκευής, μεταφοράς εξοπλισμού και μελλοντικής συντήρησης. Οι Tahri et al. (2015) και Almasad et al. (2023) διαπίστωσαν ότι οι θέσεις που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από υφιστάμενα οδικά δίκτυα παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με απομονωμένες περιοχές.

2.4.3 Περιβαλλοντικά Κριτήρια

Τα περιβαλλοντικά κριτήρια αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη κατηγορία παραμέτρων και αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των φωτοβολταϊκών έργων στα φυσικά οικοσυστήματα. Η διεθνής βιβλιογραφία δίνει ιδιαίτερη έμφαση στις προστατευόμενες περιοχές, στις χρήσεις γης, στα υδατικά συστήματα και στις περιοχές υψηλής οικολογικής αξίας (Charabi & Gastli, 2011; Tahri et al., 2015).

2.4.3.1 Χρήσεις Γης

Οι χρήσεις γης αποτελούν βασικό παράγοντα αποκλεισμού ή καταλληλότητας. Εκτάσεις με γεωργική παραγωγή υψηλής αξίας, πυκνά δάση ή αστικές περιοχές θεωρούνται συνήθως ακατάλληλες για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων. Αντίθετα, εγκαταλελειμμένες, υποβαθμισμένες ή χαμηλής παραγωγικότητας εκτάσεις εμφανίζουν υψηλότερο βαθμό καταλληλότητας (Guaita-Pradas et al., 2019; Zambrano-Asanza et al., 2021).

2.4.3.2 Προστατευόμενες Περιοχές Natura 2000

Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων εντός ή πλησίον προστατευόμενων περιοχών συνήθως αποκλείεται ή υπόκειται σε αυστηρούς περιορισμούς. Οι Bertsiou et al. (2025) χρησιμοποίησαν ζώνες αποκλεισμού (buffer zones) γύρω από προστατευόμενα οικοσυστήματα και περιοχές Natura 2000, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα.

2.4.3.3 Υδατικά Συστήματα

Η προστασία των ποταμών, λιμνών, υδροτόπων και υπόγειων υδάτων αποτελεί σημαντικό κριτήριο. Οι Tahri et al. (2015) και Almasad et al. (2023) προτείνουν τη δημιουργία ζωνών

προστασίας γύρω από τα υδατικά σώματα ώστε να αποφεύγονται αρνητικές επιπτώσεις στην υδρολογία και στα υδάτινα οικοσυστήματα.

2.4.4 Οικονομικά Κριτήρια

Τα οικονομικά κριτήρια σχετίζονται με τη συνολική επενδυτική βιωσιμότητα ενός φωτοβολταϊκού έργου. Σύμφωνα με τους Deveci et al. (2021), οι σημαντικότεροι οικονομικοί δείκτες είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR), η Απόδοση Επένδυσης (ROI) και το κόστος σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι, μετά την ηλιακή ακτινοβολία, οι οικονομικοί δείκτες αποτελούν τα κρίσιμότερα κριτήρια για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών.

Παράλληλα, οι Al-Ali et al. (2024) επισημαίνουν τη σημασία του κόστους γης, της απόστασης από λιμένες και μεταφορικές υποδομές, καθώς και του συνολικού επενδυτικού κόστους, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα.

2.4.5 Κοινωνικά και Θεσμικά Κριτήρια

Τα τελευταία χρόνια, η βιβλιογραφία δίνει αυξανόμενη έμφαση στα κοινωνικά και θεσμικά κριτήρια, αναγνωρίζοντας ότι η τεχνική και οικονομική καταλληλότητα δεν αρκεί για την επιτυχή υλοποίηση ενός έργου. Η κοινωνική αποδοχή, η συμμετοχή των ενδιαφερόμενων φορέων, το θεσμικό πλαίσιο και η περιβαλλοντική δικαιοσύνη επηρεάζουν καθοριστικά την τελική απόφαση χωροθέτησης.

Οι Yildiz et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η επιλογή θέσης για φωτοβολταϊκούς σταθμούς αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα που συνδυάζει αντικειμενικά και υποκειμενικά κριτήρια, ενώ η συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών και η αποφυγή κοινωνικών συγκρούσεων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη βιωσιμότητα των έργων.

Αντίστοιχα, οι Feng et al. (2025), εξετάζοντας τη χωροθέτηση υπεράκτιων φωτοβολταϊκών έργων, ανέδειξαν ως κρίσιμους παράγοντες το θεσμικό πλαίσιο, την περιβαλλοντική δικαιοσύνη, τις πολιτικές υποστήριξης και την κοινωνική αποδοχή. Οι συγγραφείς προτείνουν ένα τετραδιάστατο πλαίσιο αξιολόγησης που περιλαμβάνει τεχνολογικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και πολιτικές παραμέτρους.

Συνολικά, η σύγχρονη βιβλιογραφία συγκλίνει στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών απαιτεί την ολοκληρωμένη αξιολόγηση τεχνικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικοθεσμικών παραγόντων. Η χρήση μεθόδων

GIS–MCDM επιτρέπει την ενσωμάτωση όλων αυτών των παραμέτρων σε ένα ενιαίο πλαίσιο λήψης αποφάσεων, οδηγώντας σε περισσότερο τεκμηριωμένες, διαφανείς και βιώσιμες επιλογές χωροθέτησης (Zambrano-Asanza et al., 2021; Bertsiou et al., 2025).

3. Μεθοδολογικό Πλαίσιο

3.1 Επιλογή και Κατηγοριοποίηση Κριτηρίων

Η επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια κάθε διαδικασίας πολυκριτηριακής αξιολόγησης, καθώς επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών, η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σύνθετη, επειδή η καταλληλότητα μιας θέσης εξαρτάται ταυτόχρονα από τεχνικούς, περιβαλλοντικούς, οικονομικούς, κοινωνικούς και θεσμικούς παράγοντες. Για τον λόγο αυτό, οι σύγχρονες μελέτες GIS–MCDM προτείνουν τη συστηματική επιλογή κριτηρίων μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, ανάλυσης της διαθέσιμης χωρικής πληροφορίας και αξιοποίησης της γνώσης ειδικών επιστημόνων (Malczewski, 2006· Greene et al., 2011· Zambrano-Asanza et al., 2021).

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η διαδικασία επιλογής κριτηρίων ακολουθεί συνήθως τέσσερα βασικά στάδια. Αρχικά προσδιορίζονται οι στόχοι της χωροθέτησης και οι απαιτήσεις του έργου. Στη συνέχεια καταγράφονται όλα τα δυνητικά κριτήρια που επηρεάζουν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών. Ακολουθεί η αξιολόγηση της διαθεσιμότητας και της ποιότητας των απαιτούμενων δεδομένων, ενώ στο τελικό στάδιο πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση των κριτηρίων σε ομοιογενείς ομάδες, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων και η παραγωγή του τελικού δείκτη καταλληλότητας (Greene et al., 2011; Noorollahi et al., 2016).

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας δείχνει ότι δεν υπάρχει ένα καθολικά αποδεκτό σύνολο κριτηρίων. Αντίθετα, τα κριτήρια διαφοροποιούνται ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή, το μέγεθος του έργου, τη διαθέσιμη υποδομή και το θεσμικό πλαίσιο. Παρ' όλα αυτά, ορισμένες παράμετροι εμφανίζονται σχεδόν σε όλες τις μελέτες χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η κλίση του εδάφους, ο προσανατολισμός, η απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι χρήσεις γης και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί (Charabi & Gastli, 2011· Tahri et al., 2015· Zambrano-Asanza et al., 2021).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των Zambrano-Asanza et al. (2021), η οποία προτείνει ένα προηγμένο μοντέλο χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών που συνδυάζει GIS, πολυκριτηριακή ανάλυση και χωρική ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου. Οι συγγραφείς

υποστηρίζουν ότι η καταλληλότητα μιας θέσης δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά σε φυσικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, αλλά και στη χωρική κατανομή της ηλεκτρικής ζήτησης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στο ηλεκτρικό δίκτυο και μειώνεται η ανάγκη για επενδύσεις σε νέες υποδομές μεταφοράς ενέργειας. Στη συγκεκριμένη μελέτη τα κριτήρια οργανώνονται σε θεματικές κατηγορίες που περιλαμβάνουν περιορισμούς χρήσεων γης, τοπογραφικά χαρακτηριστικά, κλιματικές συνθήκες, εγγύτητα σε υποδομές και χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού συστήματος.

Παρόμοια προσέγγιση ακολουθούν οι Noorollahi et al. (2016), οι οποίοι ανέπτυξαν ένα πλαίσιο GIS–Fuzzy AHP για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάρκων στο Ιράν. Στη μελέτη τους τα κριτήρια ταξινομούνται σε τέσσερις βασικές ομάδες: κλιματολογικά, περιβαλλοντικά, χωροταξικά και μετεωρολογικά. Συγκεκριμένα αξιολογούνται η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η κλίση, το υψόμετρο, οι χρήσεις γης, η απόσταση από οδικά δίκτυα και γραμμές μεταφοράς, καθώς και παράγοντες όπως η νέφωση, η υγρασία και οι ημέρες σκόνης. Η ανάλυση κατέδειξε ότι η αξιολόγηση πολλών ετερογενών παραμέτρων μέσω πολυκριτηριακής προσέγγισης οδηγεί σε σημαντικά πιο αξιόπιστα αποτελέσματα συγκριτικά με τη χρήση μεμονωμένων δεικτών.

Αντίστοιχα, οι Prieto-Amparán et al. (2021) ανέπτυξαν μία μεθοδολογία αξιολόγησης καταλληλότητας για φωτοβολταϊκά πάρκα στο Μεξικό, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά σενάρια στάθμισης, το Ranking Method και το AHP. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η επιλογή των κριτηρίων αποτελεί το κρίσιμο στάδιο της ανάλυσης, καθώς η τελική καταλληλότητα μιας περιοχής επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος και το είδος των μεταβλητών που λαμβάνονται υπόψη. Η μελέτη επιβεβαιώνει ότι η ηλιακή ακτινοβολία, η τοπογραφία, οι χρήσεις γης και η προσβασιμότητα αποτελούν τα σημαντικότερα κριτήρια χωροθέτησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Πρόσφατες εφαρμογές GIS–AHP, όπως η εργασία των Islam et al. (2024) στο Μπαγκλαντές, επιβεβαιώνουν επίσης ότι η επιλογή των κριτηρίων πρέπει να βασίζεται σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που περιλαμβάνει φυσικογεωγραφικούς, κλιματικούς και τεχνικούς παράγοντες. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας, κλίσης, χρήσεων γης, εγγύτητας σε δίκτυα και υποδομές, τα οποία συνδυάστηκαν μέσω GIS–AHP για την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας.

Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ενεργειακών συστημάτων έχει οδηγήσει στη σταδιακή ενσωμάτωση επιπλέον κοινωνικών και θεσμικών κριτηρίων στις διαδικασίες χωροθέτησης. Σύγχρονες ανασκοπήσεις δείχνουν ότι παράγοντες όπως η κοινωνική αποδοχή, η συμβατότητα με τον χωροταξικό σχεδιασμό, οι διαδικασίες αδειοδότησης και οι πιθανές συγκρούσεις χρήσεων γης αποκτούν ολοένα μεγαλύτερη σημασία στη λήψη αποφάσεων (Shao et al., 2020· Rahman et al., 2022· Algazel & Badi, 2026). Η ανασκόπηση των Algazel και Badi (2026) σε 147 μελέτες GIS–MCDM έδειξε ότι πέρα από τα τεχνικά κριτήρια, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η κοινωνική αποδοχή, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, η εγγύτητα στο δίκτυο και η προσβασιμότητα μέσω οδικών υποδομών .

Επιπρόσθετα, οι Gazi et al. (2026) επισημαίνουν ότι η επιλογή κατάλληλων θέσεων για φωτοβολταϊκούς σταθμούς αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, στο οποίο συνυπάρχουν τεχνικοί, περιβαλλοντικοί, οικονομικοί και κοινωνικοί παράγοντες. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει πολλές από τις παραμέτρους χωροθέτησης, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα ανέμου, η διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθιστά αναγκαία την αξιοποίηση προηγμένων μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνουν την κατηγοριοποίηση των κριτηρίων σε διακριτές θεματικές ενότητες και την εφαρμογή μεθόδων αντικειμενικής στάθμισης, όπως η CRITIC, σε συνδυασμό με μεθόδους κατάταξης εναλλακτικών λύσεων, όπως η VIKOR. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη αξιολόγηση πολλών παραγόντων και τη μείωση της αβεβαιότητας κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών έργων. Οι ίδιοι συγγραφείς ομαδοποιούν τα κριτήρια χωροθέτησης σε ευρύτερες κατηγορίες που περιλαμβάνουν γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (κλίση, μορφολογία εδάφους), ενεργειακά κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία), περιβαλλοντικούς παράγοντες (οικολογικές επιπτώσεις), τεχνικές υποδομές (δίκτυο μεταφοράς, οδικό δίκτυο), κλιματικές συνθήκες (άνεμος, υγρασία, σκόνη) και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους (διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού και αποδοχή από την τοπική κοινωνία), επιβεβαιώνοντας ότι η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων απαιτεί μια ολιστική και πολυπαραγοντική προσέγγιση.

Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις της παρούσας έρευνας, τα κριτήρια χωροθέτησης οργανώνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικοθεσμικά. Η συγκεκριμένη ταξινόμηση

ακολουθεί τη διεθνή πρακτική και εμφανίζεται επανειλημμένα στις πλέον σύγχρονες μελέτες χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών (Guaita-Pradas et al., 2019· Zambrano-Asanza et al., 2021· Almasad et al., 2023· Yilmaz et al., 2024). Η κατηγοριοποίηση αυτή διευκολύνει τη διαδικασία στάθμισης των κριτηρίων και αποτελεί τη βάση για την εφαρμογή της μεθόδου Fuzzy AHP που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

3.2 Διαδικασία Στάθμισης

3.2.1 Θεωρητική Βάση της Στάθμισης Κριτηρίων

Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) βασίζεται στην παραδοχή ότι τα κριτήρια που συμμετέχουν σε ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων δεν έχουν την ίδια σημασία και συνεπώς δεν επηρεάζουν ισοδύναμα το τελικό αποτέλεσμα. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η διαδικασία της στάθμισης (weighting), μέσω της οποίας προσδιορίζεται η σχετική σπουδαιότητα κάθε κριτηρίου και αποδίδεται σε αυτό ένα αριθμητικό βάρος. Τα βάρη εκφράζουν τον βαθμό συμβολής κάθε μεταβλητής στη διαμόρφωση του τελικού δείκτη καταλληλότητας και αποτελούν κρίσιμο στάδιο σε κάθε εφαρμογή GIS–MCDM (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Η ανάγκη στάθμισης προκύπτει από το γεγονός ότι τα κριτήρια που συμμετέχουν στη χωροθέτηση έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας συχνά είναι ετερογενή και παρουσιάζουν διαφορετική βαρύτητα ως προς την επίτευξη του στόχου. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών η ηλιακή ακτινοβολία συνήθως θεωρείται σημαντικότερη από άλλες παραμέτρους, όπως η απόσταση από οδικά δίκτυα ή η χρήση γης, καθώς επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή απόδοση του έργου. Αντίστοιχα, περιβαλλοντικοί και κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες ενδέχεται να αποκτήσουν μεγαλύτερη σημασία όταν ο σχεδιασμός εστιάζει στη βιωσιμότητα και την κοινωνική αποδοχή των εγκαταστάσεων (Tahri et al., 2015; Noorollahi et al., 2016).

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων στάθμισης: οι υποκειμενικές (subjective weighting methods) και οι αντικειμενικές (objective weighting methods). Οι υποκειμενικές μέθοδοι βασίζονται στην εμπειρία και τις κρίσεις ειδικών εμπειρογνομόνων, ενώ οι αντικειμενικές μέθοδοι υπολογίζουν τα βάρη με βάση τα χαρακτηριστικά των ίδιων των δεδομένων, χωρίς την άμεση παρέμβαση των αποφασισζόντων (Farsi et al., 2024).

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος υποκειμενικής στάθμισης είναι η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process – AHP), η οποία αναπτύχθηκε από τον Saaty (1980). Η μέθοδος βασίζεται στη διάσπαση ενός σύνθετου προβλήματος σε μια ιεραρχική δομή επιπέδων, η οποία περιλαμβάνει τον γενικό στόχο, τις ομάδες κριτηρίων, τα υποκριτήρια και τις εναλλακτικές λύσεις. Η σχετική σημασία των κριτηρίων προσδιορίζεται μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη (pairwise comparisons), χρησιμοποιώντας την κλίμακα προτιμήσεων του Saaty από 1 έως 9. Στη συνέχεια υπολογίζεται το ιδιοδιάνυσμα του πίνακα συγκρίσεων, από το οποίο προκύπτουν τα τελικά βάρη των κριτηρίων (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Η ευρεία χρήση της AHP οφείλεται στην ικανότητά της να μετατρέπει ποιοτικές εκτιμήσεις ειδικών σε ποσοτικά βάρη, επιτρέποντας τη συστηματική και διαφανή τεκμηρίωση των αποφάσεων. Παράλληλα, η μέθοδος ενσωματώνει μηχανισμό ελέγχου της λογικής συνέπειας των κρίσεων μέσω του Δείκτη Συνέπειας (Consistency Index – CI) και του Λόγου Συνέπειας (Consistency Ratio – CR), διασφαλίζοντας ότι οι συγκρίσεις των ειδικών είναι επαρκώς συνεπείς (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Παρά τα πλεονεκτήματα της AHP, έχει επισημανθεί ότι οι ανθρώπινες κρίσεις χαρακτηρίζονται συχνά από αβεβαιότητα, ασάφεια και υποκειμενικότητα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού αναπτύχθηκε η Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP), η οποία συνδυάζει την AHP με τη θεωρία των ασαφών συνόλων (Fuzzy Set Theory). Στην προσέγγιση αυτή οι ακριβείς αριθμητικές τιμές των συγκρίσεων αντικαθίστανται από ασαφείς αριθμούς, επιτρέποντας την καλύτερη αναπαράσταση της ανθρώπινης σκέψης και της αβεβαιότητας στις εκτιμήσεις των ειδικών (Buckley, 1985; Chang, 1996).

Η σημασία της διαδικασίας στάθμισης στις εφαρμογές GIS–MCDM για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αναδεικνύεται από πληθώρα μελετών. Οι Charabi και Gastli (2011), Sánchez-Lozano et al. (2013), Noorollahi et al. (2016), Zambrano-Asanza et al. (2021) και Almasad (2022) καταδεικνύουν ότι η τελική κατανομή των κατάλληλων περιοχών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα βάρη που αποδίδονται στα επιμέρους κριτήρια. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου στάθμισης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αξιοπιστία και τη χωρική ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

3.2.2 Διαδικασία Στάθμισης με AHP

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process – AHP) αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους προσδιορισμού βαρών σε προβλήματα πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Saaty (1980) και βασίζεται στη λογική ότι οι σύνθετες αποφάσεις μπορούν να αναλυθούν σε μια ιεραρχική δομή αποτελούμενη από στόχους, κριτήρια, υποκριτήρια και εναλλακτικές λύσεις. Στη συνέχεια, η σχετική σημασία των στοιχείων κάθε επιπέδου προσδιορίζεται μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη (pairwise comparisons), επιτρέποντας τον υπολογισμό των βαρών που χρησιμοποιούνται στην τελική αξιολόγηση (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Στην παρούσα εργασία η AHP χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της σχετικής σπουδαιότητας των κριτηρίων χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία της ιεραρχικής δομής του προβλήματος, τη συμπλήρωση του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη, την κανονικοποίηση των τιμών, τον υπολογισμό του ιδιοδιανύσματος προτεραιοτήτων και τον έλεγχο της συνέπειας των κρίσεων μέσω του Consistency Ratio (CR) (Noorollahi et al., 2016; Asakereh et al., 2014).

Δημιουργία Ιεραρχικής Δομής

Το πρώτο στάδιο της μεθόδου περιλαμβάνει τη διάσπαση του προβλήματος σε διαδοχικά επίπεδα. Στην περίπτωση της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών, στην κορυφή της ιεραρχίας βρίσκεται ο στόχος, δηλαδή η επιλογή της καταλληλότερης θέσης εγκατάστασης. Στο δεύτερο επίπεδο τοποθετούνται οι βασικές κατηγορίες κριτηρίων (τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικοθεσμικά), ενώ στα επόμενα επίπεδα αναπτύσσονται τα επιμέρους κριτήρια, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η κλίση του εδάφους, οι χρήσεις γης και η απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Saaty, 1980; Noorollahi et al., 2016).



Εικόνα 9. Ιεραρχική δομή εφαρμογής της AHP για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Πηγή: Προσαρμογή από Noorollahi et al. (2016).

Συγκρίσεις Ανά Ζεύγη (Pairwise Comparisons)

Κεντρικό στοιχείο της μεθόδου Analytic Hierarchy Process (AHP) αποτελεί η πραγματοποίηση συγκρίσεων ανά ζεύγη (pairwise comparisons) μεταξύ των κριτηρίων ή των εναλλακτικών λύσεων. Για να καταστεί δυνατή η ποσοτικοποίηση των υποκειμενικών κρίσεων των ειδικών, ο Saaty (1980, 2008) ανέπτυξε μια θεμελιώδη αριθμητική κλίμακα, η οποία επιτρέπει την έκφραση της σχετικής σημασίας ενός στοιχείου έναντι ενός άλλου.

Η κλίμακα αυτή βασίζεται σε ακέραιες τιμές από 1 έως 9, όπου η τιμή 1 υποδηλώνει ίση σημασία μεταξύ δύο στοιχείων, ενώ η τιμή 9 αντιπροσωπεύει εξαιρετικά ισχυρή προτίμηση ή κυριαρχία του ενός στοιχείου έναντι του άλλου. Οι ενδιάμεσες τιμές εκφράζουν διαφορετικά επίπεδα προτίμησης, από ασθενή έως πολύ ισχυρή σημασία. Παράλληλα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ενδιάμεσες δεκαδικές τιμές (π.χ. 1,1–1,9 ή 2,5), όταν οι διαφορές μεταξύ των συγκρινόμενων στοιχείων είναι μικρές και απαιτείται λεπτομερέστερη αποτύπωση της κρίσης του αξιολογητή (Saaty, 2008).

Η διαδικασία συγκρίσεων βασίζεται στην αρχή της αμοιβαιότητας (reciprocity). Εάν ένα στοιχείο i θεωρείται, για παράδειγμα, πέντε φορές σημαντικότερο από ένα στοιχείο j , τότε στον πίνακα συγκρίσεων η θέση (i, j) λαμβάνει την τιμή 5, ενώ η συμμετρική θέση (j, i) λαμβάνει αυτόματα την αντίστροφη τιμή $1/5$. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η μαθηματική συνέπεια του πίνακα συγκρίσεων και διευκολύνεται ο υπολογισμός των τελικών βαρών των κριτηρίων.

Η θεμελιώδης κλίμακα του Saaty έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα σε εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή ποιοτικών εκτιμήσεων και εμπειρικών γνώσεων σε ποσοτικά δεδομένα, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να επεξεργαστούν μαθηματικά για τον υπολογισμό των βαρών και την ιεράρχηση των κριτηρίων (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Για παράδειγμα, εάν η ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται ισχυρά σημαντικότερη από την απόσταση από το οδικό δίκτυο, τότε αποδίδεται τιμή 5. Αντίστροφα, η τιμή στο συμμετρικό στοιχείο του πίνακα ισούται με 1/5.

Ο πίνακας συγκρίσεων Α διαμορφώνεται ως εξής:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

όπου:

- a_{ij} εκφράζει τη σχετική σπουδαιότητα του κριτηρίου i έναντι του κριτηρίου j ,
- $a_{ii} = 1$,
- $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

(Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Κανονικοποίηση του Πίνακα

Αφού συμπληρωθεί ο πίνακας συγκρίσεων, κάθε στοιχείο διαιρείται με το άθροισμα της αντίστοιχης στήλης.

Η κανονικοποιημένη τιμή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

Με τον τρόπο αυτό όλες οι στήλες αποκτούν άθροισμα ίσο με τη μονάδα και καθίστανται συγκρίσιμες μεταξύ τους (Saaty, 2008).

Υπολογισμός Βαρών (Priority Vector)

Τα βάρη των κριτηρίων υπολογίζονται ως ο μέσος όρος των στοιχείων κάθε γραμμής του κανονικοποιημένου πίνακα.

Η εξίσωση υπολογισμού είναι:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n n_{ij}$$

όπου:

- w_i = βάρος του κριτηρίου i ,
- n = αριθμός κριτηρίων.

Το διάνυσμα:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$$

αποτελεί το ιδιοδιάνυσμα προτεραιοτήτων (priority vector) της μεθόδου AHP και χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη στάθμιση των θεματικών επιπέδων GIS (Saaty, 1980; Noorollahi et al., 2016).

Έλεγχος Συνέπειας των Κρίσεων

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της AHP είναι η δυνατότητα αξιολόγησης της συνέπειας των συγκρίσεων που πραγματοποιούνται από τους ειδικούς. Ο Saaty υποστήριξε ότι οι ανθρώπινες κρίσεις δεν είναι πάντοτε απόλυτα συνεπείς και επομένως απαιτείται ποσοτικός έλεγχος της αξιοπιστίας τους (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη ιδιοτιμή:

$$\lambda_{max}$$

και στη συνέχεια ο Δείκτης Συνέπειας (Consistency Index – CI):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

όπου:

- n = αριθμός κριτηρίων.

Ακολούθως υπολογίζεται ο Λόγος Συνέπειας (Consistency Ratio – CR):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

όπου:

- RI = Random Index.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Πίνακας 2. Τυχαίος Δείκτης (Random Index – RI). Πηγή: Saaty, 2005

Σύμφωνα με τον Saaty (2005), οι συγκρίσεις θεωρούνται αποδεκτές όταν:

$$CR < 0.10$$

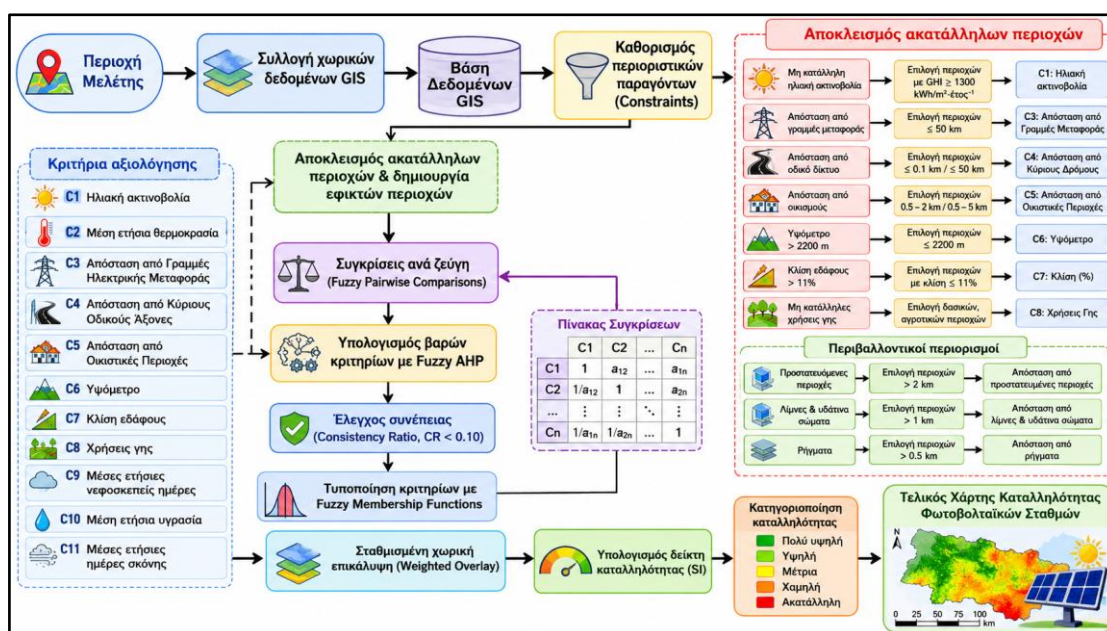
Εάν ο λόγος συνέπειας υπερβαίνει το 0,10, οι συγκρίσεις πρέπει να επανεξεταστούν και να αναθεωρηθούν μέχρι να επιτευχθεί αποδεκτό επίπεδο συνέπειας (Saaty, 2005; Noorollahi et al., 2016).

Εφαρμογή της AHP σε GIS–MCDM για Φωτοβολταϊκά

Η μέθοδος AHP χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές GIS–MCDM για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών, καθώς παρέχει ένα σαφές και διαφανές πλαίσιο στάθμισης των κριτηρίων. Οι Noorollahi et al. (2016) χρησιμοποίησαν έντεκα κριτήρια και Fuzzy AHP για την παραγωγή χάρτη καταλληλότητας στο Ιράν, ενώ οι Asakereh et al. (2014) εφάρμοσαν GIS–FAHP για την επιλογή κατάλληλων περιοχών εγκατάστασης ηλιακών πάρκων στην περιοχή Shodirwan (Εικόνα 5). Αντίστοιχα, οι Sánchez-Lozano et al. (2013) και Tahri et al. (2015) χρησιμοποίησαν την AHP για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων πριν από την εφαρμογή χωρικής επικάλυψης (weighted overlay), επιβεβαιώνοντας ότι η διαδικασία στάθμισης αποτελεί τον πυρήνα κάθε συστήματος χωρικής πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Η εικόνα 10 παρουσιάζει το ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών με συνδυασμό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της μεθόδου Fuzzy AHP. Η διαδικασία ξεκινά με τον καθορισμό της περιοχής μελέτης και τη συλλογή των απαραίτητων χωρικών δεδομένων, ενώ παράλληλα προσδιορίζονται οι περιοριστικοί παράγοντες που οδηγούν στον αποκλεισμό ακατάλληλων περιοχών. Στη

συνέχεια επιλέγονται τα κριτήρια αξιολόγησης, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η κλίση του εδάφους, οι χρήσεις γης και διάφορες μετεωρολογικές παράμετροι. Μέσω της μεθόδου Fuzzy AHP πραγματοποιούνται συγκρίσεις ανά ζεύγη των κριτηρίων και υπολογίζονται τα αντίστοιχα βάρη, ενώ ελέγχεται η συνέπεια των κρίσεων των ειδικών. Ακολούθως, τα κριτήρια τυποποιούνται με τη χρήση ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής και ενσωματώνονται σε περιβάλλον GIS μέσω σταθμισμένης χωρικής επικάλυψης (Weighted Overlay). Η διαδικασία οδηγεί στον υπολογισμό του Δείκτη Καταλληλότητας (Suitability Index), ο οποίος ταξινομείται σε κατηγορίες καταλληλότητας και αποδίδεται τελικά σε μορφή χάρτη, αναδεικνύοντας τις πλέον κατάλληλες περιοχές για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών.



Εικόνα 10. Διαδικασία ανάπτυξης χάρτη καταλληλότητας φωτοβολταϊκών σταθμών με χρήση GIS και Fuzzy AHP. Πηγή: Προσαρμογή από Noorollahi et al. (2016).

3.2.3 Διαδικασία Στάθμισης με Fuzzy AHP

Παρότι η μέθοδος AHP αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές στάθμισης κριτηρίων, η εφαρμογή της βασίζεται στην παραδοχή ότι οι αποφασίζοντες μπορούν να εκφράσουν με ακρίβεια τις προτιμήσεις τους μέσω συγκεκριμένων αριθμητικών τιμών. Στην πράξη, ωστόσο, οι ανθρώπινες κρίσεις χαρακτηρίζονται συχνά από αβεβαιότητα, ασάφεια και υποκειμενικότητα, ιδιαίτερα όταν απαιτείται η αξιολόγηση πολύπλοκων περιβαλλοντικών και ενεργειακών συστημάτων. Για παράδειγμα, είναι συχνά δύσκολο να εκτιμηθεί με απόλυτη βεβαιότητα εάν ένα κριτήριο είναι «τρεις φορές» ή «πέντε φορές»

σημαντικότερο από κάποιο άλλο. Για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού αναπτύχθηκε η Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP), η οποία συνδυάζει τη θεωρία των ασαφών συνόλων (Fuzzy Set Theory) με τη μεθοδολογία της AHP (Buckley, 1985; Chang, 1996; Al-Aziz et al., 2020).

Η θεωρία των ασαφών συνόλων εισήχθη από τον Zadeh (1965) και επιτρέπει την αναπαράσταση αβέβαιων ή ασαφών πληροφοριών μέσω βαθμών συμμετοχής αντί των κλασικών δυαδικών λογικών τιμών. Στο πλαίσιο της Fuzzy AHP, οι ακριβείς συγκρίσεις ανά ζεύγη αντικαθίστανται από ασαφείς αριθμούς, οι οποίοι μπορούν να περιγράψουν αποτελεσματικότερα τη φυσική αβεβαιότητα των ανθρώπινων εκτιμήσεων. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για προβλήματα χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών, όπου η αξιολόγηση των κριτηρίων βασίζεται συχνά σε γνώμες ειδικών και όχι αποκλειστικά σε αντικειμενικές μετρήσεις (Buckley, 1985; Kaya & Kahraman, 2010; Heo et al., 2010).

Η βασική διαφορά μεταξύ της AHP και της Fuzzy AHP είναι ότι στη δεύτερη περίπτωση οι συγκρίσεις δεν εκφράζονται με έναν μόνο αριθμό αλλά με έναν τριγωνικό ασαφή αριθμό (Triangular Fuzzy Number – TFN). Ο τριγωνικός ασαφής αριθμός ορίζεται από τρεις τιμές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν το κατώτερο όριο, την πιθανότερη τιμή και το ανώτερο όριο μιας εκτίμησης. Οι τρεις αυτές παράμετροι συμβολίζονται συνήθως ως (m_1, m_2, m_3) , όπου το m_1 εκφράζει τη μικρότερη πιθανή τιμή, το m_2 την επικρατέστερη ή πιο αντιπροσωπευτική τιμή και το m_3 τη μεγαλύτερη πιθανή τιμή. Με αυτόν τον τρόπο η αβεβαιότητα των κρίσεων ενσωματώνεται άμεσα στη διαδικασία στάθμισης (Buckley, 1985; Koohbanani et al., 2018).

Στη Fuzzy AHP οι λεκτικές αξιολογήσεις των ειδικών μετατρέπονται σε τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς. Για παράδειγμα, η έκφραση «ισχυρά σημαντικότερο» δεν αντιστοιχεί πλέον στην ακριβή τιμή 5 της κλίμακας Saaty, αλλά σε έναν ασαφή αριθμό που εκφράζει ένα εύρος πιθανών τιμών. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η αυστηρότητα των συγκρίσεων και επιτυγχάνεται πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της ανθρώπινης σκέψης (Buckley, 1985; Chang, 1996).

Στο πλαίσιο της μεθόδου Fuzzy AHP, οι λεκτικές κρίσεις των ειδικών μετατρέπονται σε τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς (Triangular Fuzzy Numbers – TFNs), ώστε να αποτυπώνεται η αβεβαιότητα και η ασάφεια που χαρακτηρίζουν την ανθρώπινη αξιολόγηση. Σε αντίθεση με την κλασική AHP, όπου κάθε σύγκριση εκφράζεται με μία μοναδική τιμή της κλίμακας

Saaty, η Fuzzy AHP χρησιμοποιεί ένα εύρος τιμών που ορίζεται από τρία σημεία: το κατώτερο όριο (l), την πιθανότερη τιμή (m) και το ανώτερο όριο (u). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στους αξιολογητές να εκφράζουν τις προτιμήσεις τους με μεγαλύτερη ευελιξία και ρεαλισμό, μειώνοντας την επίδραση πιθανών ασυνεπειών στις συγκρίσεις ανά ζεύγη (Buckley, 1985; Chang, 1996).

Η αντιστοίχιση των λεκτικών εκτιμήσεων σε τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς βασίζεται στην επέκταση της θεμελιώδους κλίμακας του Saaty σε ασαφές περιβάλλον. Για παράδειγμα, η «μέτρια σημαντικότητα» αποδίδεται από τον TFN (2,3,4), γεγονός που σημαίνει ότι η σχετική προτίμηση ενός κριτηρίου έναντι ενός άλλου εκτιμάται περίπου ίση με 3, αλλά μπορεί να κυμαίνεται από 2 έως 4. Αντίστοιχα, η «πολύ ισχυρή σημαντικότητα» αποδίδεται από τον TFN (6,7,8), υποδηλώνοντας υψηλό βαθμό προτίμησης με ενσωματωμένη αβεβαιότητα. Η χρήση των TFNs αποτελεί πλέον καθιερωμένη πρακτική στις εφαρμογές χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών με GIS–Fuzzy AHP, καθώς επιτρέπει την αποτελεσματικότερη αναπαράσταση της γνώσης των ειδικών και τη βελτίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της πολυκριτηριακής ανάλυσης (Noorollahi et al., 2016; Asakereh et al., 2014; Almasad et al., 2023).

Λεκτική αξιολόγηση	Κλασική κλίμακα Saaty	Τριγωνικός ασαφής αριθμός (TFN)
Ίση σημαντικότητα	1	(1, 1, 1)
Ασθενής έως μέτρια σημαντικότητα	2–3	(1, 2, 3)
Μέτρια σημαντικότητα	3	(2, 3, 4)
Μέτρια έως ισχυρή σημαντικότητα	4–5	(3, 4, 5)
Ισχυρή σημαντικότητα	5	(4, 5, 6)
Ισχυρή έως πολύ ισχυρή σημαντικότητα	6–7	(5, 6, 7)
Πολύ ισχυρή σημαντικότητα	7	(6, 7, 8)
Πολύ ισχυρή έως απόλυτη σημαντικότητα	8–9	(7, 8, 9)
Απόλυτη σημαντικότητα	9	(9, 9, 9)

Πίνακας 3. Αντιστοίχιση λεκτικών εκτιμήσεων και τριγωνικών ασαφών αριθμών (TFNs). Πηγή: Προσαρμογή της κλίμακας Saaty (1980, 2008) σε τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς βάσει των Buckley (1985), Chang (1996) και μεταγενέστερων εφαρμογών Fuzzy AHP.

Μετά τη δημιουργία των ασαφών πινάκων συγκρίσεων, ακολουθεί ο υπολογισμός των ασαφών βαρών. Η πλέον διαδεδομένη διαδικασία είναι η μέθοδος Extent Analysis που

προτάθηκε από τον Chang (1996), η οποία χρησιμοποιείται στη συντριπτική πλειονότητα των εφαρμογών Fuzzy AHP στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Η μέθοδος περιλαμβάνει τον υπολογισμό των ασαφών συνθετικών τιμών (fuzzy synthetic extent values), την εκτίμηση των βαθμών πιθανότητας μεταξύ των κριτηρίων και τελικά τον προσδιορισμό των σχετικών βαρών (Chang, 1996).

Το επόμενο στάδιο αφορά τη διαδικασία αποασαφοποίησης (defuzzification), κατά την οποία οι ασαφείς τιμές μετατρέπονται σε πραγματικούς αριθμούς ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους επόμενους υπολογισμούς. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη διότι τα τελικά βάρη των κριτηρίων πρέπει να εκφράζονται σε μία ενιαία αριθμητική μορφή προκειμένου να εφαρμοστούν στη χωρική ανάλυση και στη σύνθεση του δείκτη καταλληλότητας (Chang, 1996; Taylan et al., 2020).

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η Fuzzy AHP εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της κλασικής AHP όταν οι κρίσεις χαρακτηρίζονται από υψηλή αβεβαιότητα. Οι Al-Aziz et al. (2020), συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η Fuzzy AHP παράγει πιο σταθερά και αξιόπιστα αποτελέσματα σε περιπτώσεις ασυνεπών ή ασαφών εκτιμήσεων. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι η ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής μειώνει την επίδραση των ακραίων τιμών και βελτιώνει την αξιοπιστία των τελικών βαρών, ιδιαίτερα όταν οι αξιολογήσεις προέρχονται από διαφορετικούς ειδικούς.

Η αποτελεσματικότητα της Fuzzy AHP έχει επιβεβαιωθεί από πολλές εφαρμογές στον τομέα της ενεργειακής πολιτικής και των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Οι Kaya και Kahraman (2010) χρησιμοποίησαν έναν συνδυασμό Fuzzy AHP και VIKOR για την αξιολόγηση ενεργειακών τεχνολογιών, αποδεικνύοντας ότι η μέθοδος μπορεί να ενσωματώσει αποτελεσματικά τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Αντίστοιχα, οι Heo et al. (2010) εφάρμοσαν τη Fuzzy AHP για την αξιολόγηση προγραμμάτων διάδοσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καταδεικνύοντας ότι οι οικονομικές, περιβαλλοντικές, τεχνολογικές και πολιτικές παράμετροι μπορούν να αξιολογηθούν ταυτόχρονα σε ένα ενιαίο πλαίσιο λήψης αποφάσεων.

Ιδιαίτερα σημαντική για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών είναι η εφαρμογή της Fuzzy AHP σε συνδυασμό με GIS. Οι Charabi και Gastli (2011) ήταν από τους πρώτους που ενσωμάτωσαν ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής και Fuzzy MCDM στη χωρική αξιολόγηση θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών. Παρόμοια προσέγγιση

ακολούθησαν οι Noorollahi et al. (2016), οι οποίοι χρησιμοποίησαν Fuzzy AHP για τη στάθμιση έντεκα κριτηρίων χωροθέτησης και στη συνέχεια συνέθεσαν τα αποτελέσματα μέσω GIS weighted overlay για την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος μπορεί να αποδώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική σημασία των κριτηρίων σε σχέση με την κλασική AHP.

Πρόσφατες έρευνες επιβεβαιώνουν ότι η Fuzzy AHP εξακολουθεί να αποτελεί την κυρίαρχη μέθοδο στάθμισης σε εφαρμογές GIS–MCDM για φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι Almasad et al. (2023) και Yilmaz et al. (2024) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο για την αξιολόγηση περιβαλλοντικών, τεχνικών και χωρικών παραγόντων, αποδεικνύοντας ότι η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας οδηγεί σε πιο ρεαλιστικούς χάρτες καταλληλότητας και βελτιώνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

3.2.4 Στάθμιση σε GIS–MCDM για Φωτοβολταϊκά

Η διαδικασία στάθμισης των κριτηρίων αποτελεί το κρίσιμο στάδιο σύνδεσης μεταξύ της πολυκριτηριακής ανάλυσης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Ενώ οι μέθοδοι AHP και Fuzzy AHP χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σχετικής σημαντικότητας των κριτηρίων, τα GIS αξιοποιούνται για τη χωρική αναπαράσταση και σύνθεση των δεδομένων, οδηγώντας στην παραγωγή χαρτών καταλληλότητας (suitability maps). Ο συνδυασμός αυτός έχει εξελιχθεί σε μία από τις πλέον διαδεδομένες προσεγγίσεις για τη χωροθέτηση έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ιδιαίτερα φωτοβολταϊκών σταθμών, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη αξιολόγηση μεγάλου αριθμού χωρικών και μη χωρικών παραμέτρων (Malczewski, 2006; Shao et al., 2020; Rahman et al., 2022).

Στις περισσότερες εφαρμογές GIS–MCDM η διαδικασία ακολουθεί μία συγκεκριμένη αλληλουχία βημάτων. Αρχικά συλλέγονται και προεπεξεργάζονται τα γεωχωρικά δεδομένα που αντιστοιχούν στα επιλεγμένα κριτήρια, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η κλίση και ο προσανατολισμός του εδάφους, οι χρήσεις γης, η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί. Στη συνέχεια κάθε θεματικό επίπεδο μετατρέπεται σε χάρτη καταλληλότητας μέσω διαδικασιών τυποποίησης ή ασαφοποίησης (fuzzy standardization), ώστε όλες οι μεταβλητές να εκφράζονται σε κοινή κλίμακα αξιολόγησης. Ακολουθεί η εφαρμογή των βαρών που έχουν προκύψει από την AHP ή τη Fuzzy AHP και τέλος πραγματοποιείται η σύνθεση των επιμέρους επιπέδων μέσω χωρικής επικάλυψης (Weighted

Overlay Analysis), οδηγώντας στην παραγωγή του τελικού δείκτη καταλληλότητας (Malczewski & Rinner, 2015; Noorollahi et al., 2016).

Η πρώτη ολοκληρωμένη εφαρμογή της προσέγγισης GIS–Fuzzy MCDM για φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάστηκε από τους Charabi και Gastli (2011), οι οποίοι ανέπτυξαν ένα μοντέλο χωρικής ασαφούς πολυκριτηριακής αξιολόγησης για το Σουλτανάτο του Ομάν. Οι συγγραφείς αξιοποίησαν γεωχωρικά δεδομένα σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία, την τοπογραφία, τις χρήσεις γης και τις υποδομές μεταφοράς ενέργειας, τα οποία μετατράπηκαν σε ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής. Η τελική καταλληλότητα προέκυψε μέσω συνδυασμού των ασαφών χαρτών και των αντίστοιχων βαρών, αποδεικνύοντας ότι η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στη διαδικασία στάθμισης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Charabi & Gastli, 2011).

Σημαντική συμβολή στη σύνδεση της AHP με τα GIS προσέφεραν οι Sánchez-Lozano et al. (2013), οι οποίοι αξιολόγησαν εναλλακτικές θέσεις εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάρκων στη νοτιοανατολική Ισπανία. Στη μελέτη τους χρησιμοποιήθηκαν τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια, ενώ τα βάρη προσδιορίστηκαν μέσω της AHP. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε χωρική επικάλυψη των θεματικών επιπέδων και παράχθηκαν χάρτες καταλληλότητας για διαφορετικά σενάρια αξιολόγησης. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επιλογή των βαρών επηρεάζει σημαντικά τη χωρική κατανομή των κατάλληλων περιοχών και συνεπώς αποτελεί κρίσιμο παράγοντα της τελικής απόφασης.

Ανάλογη προσέγγιση ακολούθησαν οι Tahri et al. (2015) στο Μαρόκο, εφαρμόζοντας ένα GIS–MCDM μοντέλο βασισμένο σε δεκαπέντε διαφορετικά κριτήρια χωροθέτησης. Η στάθμιση των κριτηρίων πραγματοποιήθηκε μέσω AHP και τα προκύπτοντα βάρη ενσωματώθηκαν σε διαδικασία Weighted Linear Combination (WLC). Η τεχνική αυτή βασίζεται στον πολλαπλασιασμό κάθε θεματικού επιπέδου με το αντίστοιχο βάρος του και στη συνέχεια στον αθροιστικό συνδυασμό όλων των επιπέδων. Οι συγγραφείς έδειξαν ότι η μέθοδος μπορεί να αποδώσει με υψηλή ακρίβεια τις πλέον κατάλληλες περιοχές εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάρκων, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη διαφανή αξιολόγηση των επιμέρους κριτηρίων (Tahri et al., 2015).

Η διαδικασία σύνθεσης του τελικού δείκτη καταλληλότητας βασίζεται συνήθως στη μέθοδο Weighted Linear Combination, η οποία εκφράζεται από τη σχέση:

$$SI = \sum_{i=1}^n (W_i \times X_i)$$

όπου:

- SI είναι ο τελικός δείκτης καταλληλότητας,
- W_i το βάρος του κριτηρίου i ,
- X_i η τυποποιημένη ή ασαφοποιημένη τιμή του κριτηρίου,
- n ο συνολικός αριθμός κριτηρίων.

Η εξίσωση αυτή αποτελεί τη βάση των περισσότερων εφαρμογών GIS–MCDM στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών (Tahri et al., 2015; Noorollahi et al., 2016; Almasad et al., 2023).

Τα τελευταία χρόνια η βιβλιογραφία έχει μετατοπιστεί προς πιο σύνθετα μοντέλα που ενσωματώνουν πρόσθετες ενεργειακές και χωρικές παραμέτρους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εργασία των Zambrano-Asanza et al. (2021), οι οποίοι συνδύασαν την πολυκριτηριακή ανάλυση με δεδομένα ηλεκτρικού φορτίου. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις που βασίζονται αποκλειστικά σε φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά, οι συγγραφείς υποστήριξαν ότι η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τη χωρική κατανομή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό ανέπτυξαν ένα μοντέλο GIS–MCDM στο οποίο οι χάρτες καταλληλότητας συνδυάζονται με χάρτες πυκνότητας φορτίου, οδηγώντας σε αποτελέσματα περισσότερο συμβατά με τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού συστήματος.

Ακόμη πιο εξελιγμένες προσεγγίσεις παρουσιάζονται από τους Almasad et al. (2023), οι οποίοι αξιοποίησαν Fuzzy MCDM σε συνδυασμό με GIS για την αξιολόγηση θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών. Στη μελέτη τους εφαρμόστηκαν ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής σε όλα τα κριτήρια, ενώ τα βάρη προσδιορίστηκαν μέσω fuzzy διαδικασιών στάθμισης. Οι τελικοί χάρτες καταλληλότητας παρήχθησαν μέσω χωρικής επικάλυψης των ασαφοποιημένων θεματικών επιπέδων, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη διαχείριση της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τα περιβαλλοντικά και τεχνικά δεδομένα.

Η σύγχρονη βιβλιογραφία συγκλίνει στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση της AHP ή της Fuzzy AHP στα GIS αποτελεί σήμερα την κυρίαρχη μεθοδολογική προσέγγιση για τη

χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Οι Shao et al. (2020), μέσα από ανασκόπηση 85 σχετικών μελετών, διαπίστωσαν ότι περισσότερο από το ήμισυ των εφαρμογών βασίζεται σε συνδυασμό GIS–AHP ή GIS–Fuzzy AHP. Αντίστοιχα, οι Rahman et al. (2022) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μέθοδοι αυτές προσφέρουν τον καλύτερο συνδυασμό διαφάνειας, ευελιξίας και δυνατότητας ενσωμάτωσης ετερογενών δεδομένων, καθιστώντας τες ιδιαίτερα κατάλληλες για σύνθετα προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού.

3.3 Σύνθεση Δείκτη Καταλληλότητας

3.3.1 Θεωρητική Βάση του Δείκτη Καταλληλότητας

Η σύνθεση του Δείκτη Καταλληλότητας (Suitability Index – SI) αποτελεί το τελικό στάδιο της πολυκριτηριακής χωρικής ανάλυσης και έχει ως στόχο την ενοποίηση πολλαπλών κριτηρίων σε μία ενιαία τιμή που εκφράζει τον βαθμό καταλληλότητας κάθε χωρικής μονάδας για μια συγκεκριμένη χρήση γης ή επένδυση. Στο πλαίσιο της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών, ο δείκτης καταλληλότητας συνδυάζει τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια, ώστε να εντοπιστούν οι περιοχές που παρουσιάζουν τις βέλτιστες συνθήκες εγκατάστασης (Malczewski, 2006; Malczewski & Rinner, 2015).

Η έννοια του suitability analysis βασίζεται στην παραδοχή ότι η καταλληλότητα μιας περιοχής δεν καθορίζεται από ένα μόνο χαρακτηριστικό αλλά από το συνδυασμένο αποτέλεσμα πολλών παραγόντων. Για παράδειγμα, μία περιοχή μπορεί να διαθέτει υψηλό ηλιακό δυναμικό, αλλά να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ή να εμπίπτει σε περιβαλλοντικά προστατευόμενη ζώνη. Συνεπώς, απαιτείται η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου αξιολόγησης που να λαμβάνει υπόψη ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια και να αποδίδει μια συνολική βαθμολογία καταλληλότητας (Malczewski, 2006).

Σύμφωνα με τους Malczewski και Rinner (2015), η διαδικασία σύνθεσης ενός δείκτη καταλληλότητας εντάσσεται στα Συστήματα Υποστήριξης Χωρικών Αποφάσεων (Spatial Decision Support Systems – SDSS), όπου τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) αναλαμβάνουν τη διαχείριση και ανάλυση των χωρικών δεδομένων και οι μέθοδοι Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) την αξιολόγηση και στάθμιση των κριτηρίων. Η συνέργεια GIS και MCDA επιτρέπει τη μετατροπή των γεωγραφικών δεδομένων και των προτιμήσεων των αποφασιζόντων σε πληροφορία υποστήριξης αποφάσεων, η οποία εκφράζεται συνήθως με τη μορφή χαρτών καταλληλότητας.

Η διαδικασία κατασκευής του δείκτη καταλληλότητας περιλαμβάνει συνήθως πέντε βασικά στάδια:

1. Επιλογή και προετοιμασία των κριτηρίων.
2. Τυποποίηση (standardization) ή ασαφοποίηση (fuzzification) των δεδομένων.
3. Υπολογισμό βαρών μέσω AHP ή Fuzzy AHP.
4. Σύνθεση των κριτηρίων με μεθόδους χωρικής επικάλυσης.
5. Παραγωγή και κατηγοριοποίηση του τελικού χάρτη καταλληλότητας.

Τα στάδια αυτά αποτελούν τον πυρήνα των περισσότερων εφαρμογών GIS–MCDM στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και επαναλαμβάνονται σχεδόν σε όλες τις σύγχρονες μελέτες του πεδίου (Charabi & Gastli, 2011; Noorollahi et al., 2016; Almasad et al., 2023; Zambrano-Asanza et al., 2021).

Πριν από τη σύνθεση του τελικού δείκτη, είναι απαραίτητο όλα τα κριτήρια να μετατραπούν σε κοινή κλίμακα αξιολόγησης. Η ανάγκη αυτή προκύπτει επειδή τα επιμέρους δεδομένα εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες μέτρησης. Για παράδειγμα, η ηλιακή ακτινοβολία αποδίδεται σε kWh/m², η κλίση σε μοίρες, η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο σε μέτρα και οι χρήσεις γης σε κατηγορίες. Εάν οι μεταβλητές αυτές συνδυαστούν απευθείας, τα αποτελέσματα θα είναι παραπλανητικά. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται διαδικασίες τυποποίησης ή ασαφοποίησης ώστε όλες οι μεταβλητές να εκφράζονται σε κοινή κλίμακα, συνήθως από 0 έως 1 ή από 0 έως 100 (Malczewski & Rinner, 2015).

Στις εφαρμογές GIS–Fuzzy MCDM, η τυποποίηση πραγματοποιείται μέσω συναρτήσεων συμμετοχής (membership functions), οι οποίες μετατρέπουν κάθε αρχική τιμή σε βαθμό καταλληλότητας. Οι Charabi και Gastli (2011) υποστηρίζουν ότι οι ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής αποδίδουν πιο ρεαλιστικά τη σταδιακή μετάβαση μεταξύ κατάλληλων και ακατάλληλων περιοχών σε σχέση με τις κλασικές δυαδικές προσεγγίσεις. Έτσι, η καταλληλότητα δεν εκφράζεται ως «κατάλληλο» ή «ακατάλληλο», αλλά ως συνεχές μέγεθος μεταξύ 0 και 1.

Μετά την τυποποίηση, κάθε κριτήριο πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο βάρος που έχει υπολογιστεί μέσω AHP ή Fuzzy AHP. Τα βάρη αυτά εκφράζουν τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου στη διαδικασία λήψης απόφασης και αποτελούν το βασικό μηχανισμό ενσωμάτωσης των προτιμήσεων των ειδικών στο μοντέλο χωροθέτησης. Η τελική σύνθεση

πραγματοποιείται συνήθως με τη μέθοδο Weighted Linear Combination (WLC), η οποία θεωρείται η πλέον διαδεδομένη τεχνική σύνθεσης δεικτών καταλληλότητας σε εφαρμογές GIS–MCDA (Malczewski, 2006; Tahri et al., 2015).

Η έξοδος της διαδικασίας είναι ένας συνεχής χάρτης καταλληλότητας, στον οποίο κάθε εικονοστοιχείο ή χωρική μονάδα λαμβάνει μία αριθμητική τιμή καταλληλότητας. Στη συνέχεια ο χάρτης ταξινομείται συνήθως σε πέντε κατηγορίες, όπως Πολύ Χαμηλή, Χαμηλή, Μέτρια, Υψηλή και Πολύ Υψηλή Καταλληλότητα, ώστε να διευκολύνεται η ερμηνεία και η λήψη αποφάσεων (Noorollahi et al., 2016; Sánchez-Lozano et al., 2013).

3.3.2 Weighted Linear Combination (WLC)

Η μέθοδος Weighted Linear Combination (WLC) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη τεχνική σύνθεσης δεικτών καταλληλότητας στις εφαρμογές GIS–MCDA και χρησιμοποιείται ευρέως στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου είναι ότι η συνολική καταλληλότητα μιας χωρικής μονάδας προκύπτει από το σταθμισμένο άθροισμα όλων των επιμέρους κριτηρίων. Κάθε κριτήριο συμμετέχει στη διαδικασία ανάλογα με τη σχετική βαρύτητα που του έχει αποδοθεί μέσω μεθόδων όπως η AHP ή η Fuzzy AHP, ενώ οι αρχικές τιμές των κριτηρίων έχουν προηγουμένως τυποποιηθεί ή ασαφοποιηθεί ώστε να εκφράζονται σε κοινή κλίμακα αξιολόγησης (Malczewski, 2006; Malczewski & Rinner, 2015).

Η WLC θεωρείται αντισταθμιστική (compensatory) μέθοδος, καθώς επιτρέπει σε ένα κριτήριο με χαμηλή επίδοση να αντισταθμιστεί από ένα άλλο κριτήριο με υψηλή επίδοση. Για παράδειγμα, μια περιοχή που βρίσκεται σχετικά μακριά από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εξακολουθεί να θεωρείται κατάλληλη εάν διαθέτει εξαιρετικά υψηλό ηλιακό δυναμικό και ευνοϊκή τοπογραφία. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τη WLC ιδιαίτερα κατάλληλη για προβλήματα χωροθέτησης ΑΠΕ, όπου οι αποφάσεις βασίζονται σε πολλαπλά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια (Malczewski, 2006).

Μαθηματική Διατύπωση του Δείκτη Καταλληλότητας

Ο τελικός Δείκτης Καταλληλότητας (Suitability Index – SI) υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$SI = \sum_{i=1}^n W_i X_i$$

όπου:

- **SI** = Δείκτης Καταλληλότητας
- **Wi** = βάρος του κριτηρίου *i*
- **Xi** = τυποποιημένη ή ασαφοποιημένη τιμή του κριτηρίου *i*
- **n** = αριθμός κριτηρίων

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τον βασικό πυρήνα των περισσότερων εφαρμογών GIS-MCDM και χρησιμοποιείται τόσο σε κλασικές AHP εφαρμογές όσο και σε υβριδικά μοντέλα Fuzzy AHP (Malczewski & Rinner, 2015).

Στην περίπτωση ύπαρξης χωρικών περιορισμών (constraints), η εξίσωση επεκτείνεται ως:

$$SI = \left(\sum_{i=1}^n W_i X_i \right) \times C$$

όπου:

- **C = 0** για αποκλειόμενες περιοχές
- **C = 1** για επιτρεπόμενες περιοχές

Οι περιορισμοί μπορεί να περιλαμβάνουν:

- περιοχές Natura 2000,
- υδατορεύματα,
- αστικές περιοχές,
- αεροδρόμια,
- στρατιωτικές εγκαταστάσεις,
- ζώνες προστασίας μνημείων.

Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα στις μελέτες των Noorollahi et al. (2016) και Sánchez-Lozano et al. (2013). Η μέθοδος Weighted Linear Combination αποτελεί τη θεμελιώδη διαδικασία σύνθεσης δεικτών καταλληλότητας σε εφαρμογές GIS-MCDA. Μέσω της συνδυαστικής αξιοποίησης τυποποιημένων κριτηρίων και σταθμισμένων προτιμήσεων, η WLC επιτρέπει την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας που υποστηρίζουν αντικειμενικές και τεκμηριωμένες αποφάσεις χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών. Οι εφαρμογές των Noorollahi et al. (2016), Tahri et al. (2015) και Zambrano-Asanza et al. (2021) καταδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση της AHP ή της Fuzzy AHP στη διαδικασία

Weighted Overlay αποτελεί σήμερα την κυρίαρχη προσέγγιση για τη δημιουργία σύνθετων δεικτών καταλληλότητας σε περιβάλλον GIS.

3.3.3 Σύνθεση Δείκτη Καταλληλότητας με GIS–Fuzzy MCDM

Η σύνθεση του τελικού δείκτη καταλληλότητας αποτελεί το σημαντικότερο στάδιο της πολυκριτηριακής χωρικής ανάλυσης, καθώς σε αυτό ενσωματώνονται οι επιμέρους πληροφορίες που προέρχονται από τα διαφορετικά κριτήρια αξιολόγησης σε έναν ενιαίο χωρικό δείκτη. Στα σύγχρονα μοντέλα χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών, η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται συνήθως μέσω του συνδυασμού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic) και πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων (MCDM), επιτρέποντας την ταυτόχρονη διαχείριση ποσοτικών δεδομένων, χωρικών περιορισμών και αβεβαιότητας στις κρίσεις των ειδικών (Charabi & Gastli, 2011; Almasad et al., 2023).

Η βασική φιλοσοφία των προσεγγίσεων GIS–Fuzzy MCDM στηρίζεται στη μετατροπή κάθε κριτηρίου σε έναν τυποποιημένο δείκτη καταλληλότητας μέσω ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής (fuzzy membership functions). Με τον τρόπο αυτό, οι αρχικές τιμές των κριτηρίων, οι οποίες συχνά εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες μέτρησης (π.χ. kWh/m², %, km ή m), μετατρέπονται σε μία κοινή κλίμακα τιμών, συνήθως μεταξύ 0 και 1. Οι τιμές που προσεγγίζουν το 1 αντιστοιχούν σε υψηλή καταλληλότητα, ενώ οι τιμές που προσεγγίζουν το 0 υποδηλώνουν χαμηλή ή μηδενική καταλληλότητα για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων (Charabi & Gastli, 2011).

Οι Charabi και Gastli (2011) ήταν από τους πρώτους ερευνητές που εφάρμοσαν συστηματικά την ασαφή χωρική αξιολόγηση (spatial fuzzy evaluation) στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Στη μελέτη τους ανέπτυξαν ένα μοντέλο GIS–Fuzzy MCDA στο οποίο κάθε κριτήριο μετασχηματίζεται μέσω κατάλληλων συναρτήσεων συμμετοχής και στη συνέχεια συνδυάζεται μέσω ασαφούς χωρικής επικάλυψης (fuzzy overlay). Η μεθοδολογία αυτή επέτρεψε την παραγωγή ενός συνεχούς δείκτη καταλληλότητας (Suitability Index), ο οποίος απεικονίζει σταδιακές μεταβολές της καταλληλότητας στον χώρο, αποφεύγοντας τις απότομες μεταβάσεις που συχνά εμφανίζονται στις κλασικές μεθόδους ταξινόμησης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρείται θεμελιώδης για την ανάπτυξη των μεταγενέστερων εφαρμογών GIS–Fuzzy MCDM σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η περαιτέρω εξέλιξη των μοντέλων αυτών παρουσιάζεται στη μελέτη των Almasad et al. (2023), οι οποίοι ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο GIS–Fuzzy MCDM για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας. Η μεθοδολογία τους βασίζεται αρχικά στη χρήση της Fuzzy AHP για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των συγκρίσεων μεταξύ των ειδικών. Στη συνέχεια, τα σταθμισμένα κριτήρια συνδυάζονται σε περιβάλλον GIS μέσω χωρικής επικάλυψης, ενώ παράλληλα αξιοποιούνται τεχνικές κατάταξης όπως η μέθοδος PROMETHEE για τη βελτίωση της διαδικασίας αξιολόγησης των εναλλακτικών χωρικών μονάδων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας σύνθετος δείκτης καταλληλότητας, ο οποίος ενσωματώνει τεχνικές, περιβαλλοντικές και χωροταξικές παραμέτρους σε ένα ενιαίο μοντέλο λήψης αποφάσεων (Almasad et al., 2023).

Η σύνθεση του δείκτη καταλληλότητας στα συστήματα GIS–Fuzzy MCDM μπορεί να περιγραφεί γενικά ως μια διαδικασία τριών διαδοχικών σταδίων. Αρχικά πραγματοποιείται η ασαφής τυποποίηση των κριτηρίων μέσω συναρτήσεων συμμετοχής. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα βάρη των κριτηρίων με τη χρήση μεθόδων όπως η Fuzzy AHP. Τέλος, τα σταθμισμένα επίπεδα πληροφορίας συνδυάζονται χωρικά μέσω διαδικασιών επικάλυψης (overlay analysis), οδηγώντας στον υπολογισμό του τελικού δείκτη καταλληλότητας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση τόσο της χωρικής πολυπλοκότητας όσο και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τα προβλήματα χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών (Charabi & Gastli, 2011; Almasad et al., 2023).

Συνεπώς, η ενσωμάτωση των GIS με την ασαφή πολυκριτηριακή ανάλυση συνιστά μία από τις πλέον ολοκληρωμένες και αξιόπιστες μεθοδολογίες για την ανάπτυξη δεικτών καταλληλότητας, καθώς επιτρέπει τη συνδυασμένη αξιολόγηση πολλαπλών και συχνά αντικρουόμενων κριτηρίων σε χωρικό περιβάλλον. Η ευρεία εφαρμογή της προσέγγισης αυτής στη σύγχρονη βιβλιογραφία καταδεικνύει την αποτελεσματικότητά της στην υποστήριξη αποφάσεων σχετικά με τη χωροθέτηση έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα φωτοβολταϊκών σταθμών.

3.3.4 Παραγωγή Χαρτών Καταλληλότητας

Η παραγωγή χαρτών καταλληλότητας (Suitability Mapping) αποτελεί το τελικό στάδιο της διαδικασίας χωρικής πολυκριτηριακής αξιολόγησης και αποσκοπεί στη χωρική απεικόνιση του βαθμού καταλληλότητας κάθε περιοχής ως προς τον υπό εξέταση σκοπό. Στο πλαίσιο

της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών, οι χάρτες καταλληλότητας αποτυπώνουν τη χωρική κατανομή των περιοχών που παρουσιάζουν διαφορετικό επίπεδο καταλληλότητας για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των επιλεγμένων κριτηρίων και των αντίστοιχων βαρών τους (Malczewski, 2006; Malczewski & Rinner, 2015).

Η δημιουργία ενός χάρτη καταλληλότητας βασίζεται στην αρχή ότι κάθε χωρική μονάδα αξιολογείται ταυτόχρονα ως προς πολλαπλά κριτήρια, τα οποία έχουν προηγουμένως τυποποιηθεί και σταθμιστεί. Μέσω της εφαρμογής χωρικών πράξεων επικάλυψης (spatial overlay operations), οι επιμέρους χάρτες των κριτηρίων συνδυάζονται ώστε να παραχθεί ένας ενιαίος δείκτης καταλληλότητας για κάθε κελί (cell) ή πολύγωνο της περιοχής μελέτης. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη μετατροπή μεγάλου όγκου γεωχωρικών πληροφοριών σε ένα ενιαίο και εύκολα ερμηνεύσιμο αποτέλεσμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη αποφάσεων χωροθέτησης (Greene et al., 2011; Malczewski & Rinner, 2015).

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η παραγωγή χαρτών καταλληλότητας περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια. Αρχικά πραγματοποιείται η συλλογή και προετοιμασία των χωρικών δεδομένων που σχετίζονται με τα επιλεγμένα κριτήρια. Στη συνέχεια κάθε θεματικό επίπεδο μετατρέπεται σε κοινή κλίμακα αξιολόγησης μέσω διαδικασιών τυποποίησης ή ασαφοποίησης. Ακολουθεί η ενσωμάτωση των βαρών που έχουν υπολογιστεί με τη χρήση AHP ή Fuzzy AHP και τέλος εφαρμόζεται η μέθοδος χωρικής επικάλυψης, από την οποία προκύπτει ο τελικός δείκτης καταλληλότητας (Malczewski, 2006; Charabi & Gastli, 2011).

Η χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών είναι καθοριστικής σημασίας στο στάδιο αυτό, καθώς παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης, ανάλυσης και συνδυασμού χωρικών δεδομένων διαφορετικής μορφής και προέλευσης. Μέσω εργαλείων όπως το Raster Calculator, το Weighted Overlay και οι συναρτήσεις Fuzzy Overlay, τα GIS επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη σύνθεση των θεματικών επιπέδων και την παραγωγή χαρτών υψηλής χωρικής ανάλυσης. Επιπλέον, παρέχουν τη δυνατότητα άμεσης οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων και εντοπισμού των πλέον κατάλληλων περιοχών εγκατάστασης (Malczewski & Rinner, 2015).

Ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο αποτελεί η ταξινόμηση (classification) του τελικού δείκτη καταλληλότητας. Ο συνεχής δείκτης που προκύπτει από τη διαδικασία χωρικής επικάλυψης μετατρέπεται συνήθως σε διακριτές κατηγορίες καταλληλότητας, ώστε να διευκολύνεται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται συχνότερα πέντε κατηγορίες:

- Πολύ Υψηλή Καταλληλότητα (Very High Suitability)
- Υψηλή Καταλληλότητα (High Suitability)
- Μέτρια Καταλληλότητα (Moderate Suitability)
- Χαμηλή Καταλληλότητα (Low Suitability)
- Ακατάλληλη Περιοχή (Unsuitable Area)

Η ταξινόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, όπως τα ίσα διαστήματα (Equal Interval), οι φυσικές διακοπές (Natural Breaks – Jenks), οι ποσοστιαίες κατανομές (Quantiles) ή προκαθορισμένα όρια καταλληλότητας, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των δεδομένων και τους στόχους της ανάλυσης (Malczewski, 2006).

Επιπλέον, πριν από την τελική παραγωγή των χαρτών καταλληλότητας είναι απαραίτητη η εφαρμογή χωρικών περιορισμών (constraints). Οι περιορισμοί αυτοί λειτουργούν ως φίλτρα αποκλεισμού περιοχών στις οποίες η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών δεν επιτρέπεται ή δεν είναι επιθυμητή. Τέτοιοι περιορισμοί μπορεί να αφορούν προστατευόμενες περιοχές Natura 2000, υδατορεύματα, οικισμούς, αρχαιολογικούς χώρους, αεροδρόμια και άλλες ειδικές ζώνες προστασίας. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι οι τελικά προτεινόμενες περιοχές πληρούν τόσο τα τεχνικά όσο και τα θεσμικά και περιβαλλοντικά κριτήρια χωροθέτησης (Greene et al., 2011; Malczewski & Rinner, 2015).

Η παραγωγή χαρτών καταλληλότητας δεν αποτελεί μόνο εργαλείο χωρικής ανάλυσης αλλά και μέσο επικοινωνίας των αποτελεσμάτων προς τους εμπλεκόμενους φορείς. Οι χάρτες επιτρέπουν την άμεση κατανόηση των χωρικών προτύπων που προκύπτουν από την πολυκριτηριακή αξιολόγηση και διευκολύνουν τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων χωροθέτησης. Για τον λόγο αυτό θεωρούνται βασικό παραδοτέο κάθε εφαρμογής GIS–MCDM και αποτελούν το κύριο μέσο υποστήριξης της τελικής απόφασης χωροθέτησης (Malczewski, 2006; Greene et al., 2011).

3.3.5 Σύγχρονες Εφαρμογές Δείκτη Καταλληλότητας

Η συνεχής ανάπτυξη των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων (MCDM) και των τεχνικών ασαφούς λογικής έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια σε σημαντική εξέλιξη των μοντέλων κατασκευής δεικτών καταλληλότητας για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Ενώ οι πρώτες εφαρμογές βασιζόνταν κυρίως σε απλές διαδικασίες χωρικής επικάλυψης και περιορισμένο αριθμό κριτηρίων, οι σύγχρονες προσεγγίσεις ενσωματώνουν πολύπλοκα χωρικά δεδομένα, ενεργειακές παραμέτρους, κοινωνικοοικονομικούς δείκτες, αναλύσεις ευαισθησίας και εναλλακτικά σενάρια αξιολόγησης. Η εξέλιξη αυτή έχει συμβάλει στη βελτίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και στην παραγωγή περισσότερο ρεαλιστικών χαρτών καταλληλότητας (Rahman et al., 2022; Shao et al., 2020).

Μία από τις σημαντικότερες τάσεις της σύγχρονης βιβλιογραφίας είναι η μετάβαση από τα παραδοσιακά μοντέλα suitability analysis σε ολοκληρωμένα συστήματα χωρικής υποστήριξης αποφάσεων, όπου ο δείκτης καταλληλότητας δεν βασίζεται αποκλειστικά σε φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά αλλά συνδυάζει τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και ενεργειακά δεδομένα. Στο πλαίσιο αυτό, η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα ολοκληρωμένου ενεργειακού σχεδιασμού και όχι απλώς ως πρόβλημα επιλογής γης (Malczewski & Rinner, 2015; Zambrano-Asanza et al., 2021).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή των Zambrano-Asanza et al. (2021), οι οποίοι πρότειναν ένα προηγμένο μοντέλο GIS–MCDM στο οποίο ο δείκτης καταλληλότητας προκύπτει από τον συνδυασμό των παραδοσιακών χωροθετικών κριτηρίων με δεδομένα ηλεκτρικής ζήτησης και πυκνότητας φορτίου. Σε αντίθεση με τις κλασικές προσεγγίσεις που εστιάζουν αποκλειστικά στην ηλιακή ακτινοβολία, την τοπογραφία ή τις χρήσεις γης, οι συγγραφείς ενσωματώνουν στον τελικό δείκτη και την κατανομή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών που δεν είναι μόνο χωρικά κατάλληλες αλλά και στρατηγικά σημαντικές για τη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς και το κόστος σύνδεσης στο δίκτυο.

Παράλληλα, οι Almasad et al. (2023) ανέπτυξαν ένα σύνθετο μοντέλο GIS–Fuzzy MCDM για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, στο οποίο ο δείκτης καταλληλότητας προκύπτει από τον συνδυασμό ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής, Fuzzy AHP και

μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει την αποτελεσματικότερη διαχείριση της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει πολλά περιβαλλοντικά και τεχνικά δεδομένα. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η χρήση ασαφών συναρτήσεων οδηγεί σε πιο ρεαλιστική αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών και μειώνει τα σφάλματα που σχετίζονται με την απότομη ταξινόμηση των περιοχών σε κατάλληλες ή ακατάλληλες.

Μία ακόμη σημαντική εξέλιξη αφορά τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών φωτοβολταϊκών συστημάτων μέσω χωρικών δεικτών καταλληλότητας. Οι Hübl et al. (2024) εισήγαγαν την έννοια του Geographic Suitability Index (GSI), εφαρμόζοντας πολυκριτηριακή ανάλυση για την αξιολόγηση διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε ευρωπαϊκές περιοχές υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας. Η μελέτη ανέδειξε ότι η καταλληλότητα μιας περιοχής εξαρτάται όχι μόνο από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της αλλά και από τον τύπο της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας που εξετάζεται. Κατά συνέπεια, διαφορετικά συστήματα εγκατάστασης μπορεί να οδηγούν σε διαφορετικές χωρικές προτεραιότητες ακόμη και εντός της ίδιας περιοχής μελέτης.

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στην αξιολόγηση της ευαισθησίας (sensitivity analysis) των δεικτών καταλληλότητας. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων GIS–MCDM επηρεάζονται σημαντικά από τα βάρη των κριτηρίων και από τη μεθοδολογία σύνθεσης που χρησιμοποιείται. Οι Zandi et al. (2025) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης φωτοβολταϊκών θέσεων εγκατάστασης μέσω πολλαπλών μοντέλων GIS–MCDM και πραγματοποίησαν εκτεταμένες αναλύσεις ευαισθησίας στα βάρη των κριτηρίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μικρές μεταβολές στα βάρη μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη χωρική κατανομή των πλέον κατάλληλων περιοχών. Η διαπίστωση αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της τεκμηριωμένης επιλογής των βαρών και της αξιολόγησης εναλλακτικών σεναρίων πριν από τη λήψη τελικών αποφάσεων.

Μία ακόμη σύγχρονη τάση αφορά τη μετάβαση από τους απλούς δείκτες καταλληλότητας σε πολυεπίεδα συστήματα αξιολόγησης που συνδυάζουν διαφορετικές μεθόδους MCDM. Στη διεθνή βιβλιογραφία παρατηρείται αυξανόμενη χρήση υβριδικών προσεγγίσεων που συνδυάζουν AHP, Fuzzy AHP, TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE και άλλες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης. Οι προσεγγίσεις αυτές επιτρέπουν τη διασταύρωση των

αποτελεσμάτων και τη μείωση της αβεβαιότητας που συνδέεται με τη χρήση μιας μόνο μεθόδου. Σύμφωνα με τους Rahman et al. (2022), τα υβριδικά μοντέλα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες ερευνητικές κατευθύνσεις στον τομέα της χωροθέτησης έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Παράλληλα, οι σύγχρονες εφαρμογές αξιοποιούν ολοένα και περισσότερο δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης, δορυφορικές εικόνες, δεδομένα τηλεπισκόπησης και υπολογιστικά εργαλεία μηχανικής μάθησης. Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών επιτρέπει τη βελτίωση της ακρίβειας των χαρτών καταλληλότητας και τη δυναμική ενημέρωσή τους όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες της περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με τους Shao et al. (2020), η σύνδεση GIS–MCDM με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και big data αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες προοπτικές για το μέλλον της χωροθέτησης ενεργειακών έργων.

Συνολικά, η σύγχρονη βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι ο δείκτης καταλληλότητας έχει εξελιχθεί από ένα απλό εργαλείο χωρικής αξιολόγησης σε ένα σύνθετο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων. Η ενσωμάτωση ασαφούς λογικής, προηγμένων πολυκριτηριακών τεχνικών, αναλύσεων ευαισθησίας και ενεργειακών δεδομένων επιτρέπει την ανάπτυξη περισσότερο αξιόπιστων και ρεαλιστικών μοντέλων χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών, συμβάλλοντας ουσιαστικά στον σχεδιασμό βιώσιμων ενεργειακών υποδομών.

Μελέτη	Μέθοδος	Καινοτομία
Zambrano-Asanza et al. (2021)	GIS–MCDM	Ενσωμάτωση ηλεκτρικού φορτίου
Almasad et al. (2023)	GIS–Fuzzy MCDM	Διαχείριση αβεβαιότητας
Hübl et al. (2024)	Geographic Suitability Index	Σύγκριση διαφορετικών τύπων Φ/Β
Zandi et al. (2025)	GIS–MCDM + Sensitivity Analysis	Έλεγχος ευαισθησίας βαρών
Rahman et al. (2022)	Ανασκόπηση MCDM	Υβριδικά μοντέλα αξιολόγησης

Πίνακας 4 Σύγκριση σύγχρονων προσεγγίσεων κατασκευής δεικτών καταλληλότητας

3.4 Εναλλακτικά Σενάρια Αξιολόγησης

Η διαδικασία χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων χαρακτηρίζεται από σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας, καθώς τα τελικά αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των κριτηρίων, τη

μεθοδολογία στάθμισης και τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη και αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων αποτελεί πλέον καθιερωμένη πρακτική στις σύγχρονες εφαρμογές GIS–MCDM, επιτρέποντας τη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών παραδοχών και στρατηγικών λήψης αποφάσεων στα τελικά αποτελέσματα χωροθέτησης (Prieto-Amparán et al., 2021· Tarife et al., 2023).

Η λογική των εναλλακτικών σεναρίων βασίζεται στην παραδοχή ότι δεν υπάρχει μία μοναδική «βέλτιστη» λύση, αλλά διαφορετικές χωρικές λύσεις οι οποίες προκύπτουν ανάλογα με τη σχετική βαρύτητα που αποδίδεται στα επιμέρους κριτήρια. Για παράδειγμα, ένα σενάριο μπορεί να δίνει έμφαση στη μέγιστη ενεργειακή απόδοση, ενώ ένα άλλο να δίνει προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή στη μείωση του κόστους σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών σεναρίων παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη σταθερότητα και την αξιοπιστία της προτεινόμενης χωροθέτησης.

Σημαντική συμβολή στον τομέα αυτό παρουσιάζει η εργασία των Prieto-Amparán et al. (2021), οι οποίοι ανέπτυξαν δύο διακριτά σενάρια αξιολόγησης για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Στο πρώτο σενάριο τα βάρη των κριτηρίων υπολογίστηκαν με τη μέθοδο AHP, ενώ στο δεύτερο χρησιμοποιήθηκε απλή μέθοδος κατάταξης (ranking method). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η προσέγγιση AHP οδήγησε στον εντοπισμό μεγαλύτερης έκτασης περιοχών υψηλής και πολύ υψηλής καταλληλότητας. Το εύρημα αυτό αποδίδεται στην ικανότητα της AHP να αποτυπώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη σχετική σημασία των κριτηρίων μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη, σε αντίθεση με τις απλούστερες μεθόδους κατάταξης που βασίζονται κυρίως στη σειρά προτεραιότητας των παραμέτρων.

Ανάλογη προσέγγιση ακολουθούν και οι Tarife et al. (2023), οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων αποτελεί απαραίτητο στάδιο στις εφαρμογές χωροθέτησης ΑΠΕ, καθώς επιτρέπει την εξέταση διαφορετικών αναπτυξιακών στρατηγικών και την προσαρμογή των αποτελεσμάτων στις απαιτήσεις των εμπλεκόμενων φορέων. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η χρήση πολλαπλών σεναρίων συμβάλλει στην ενίσχυση της διαφάνειας της διαδικασίας λήψης αποφάσεων και διευκολύνει την τεκμηρίωση της τελικής επιλογής.

Η σημασία της ανάλυσης σεναρίων αναδεικνύεται ακόμη περισσότερο στις πρόσφατες εργασίες των Zandi και Lotfata (2025), οι οποίοι εφαρμόζουν διαφορετικά μοντέλα GIS–MCDM για την αξιολόγηση εναλλακτικών περιοχών εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών. Οι συγγραφείς συγκρίνουν διαφορετικές προσεγγίσεις υπολογισμού του δείκτη καταλληλότητας και δείχνουν ότι μικρές μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις στη χωρική κατανομή των πλέον κατάλληλων περιοχών. Για τον λόγο αυτό προτείνουν τη συστηματική εφαρμογή αναλύσεων ευαισθησίας (sensitivity analysis) προκειμένου να ελεγχθεί η σταθερότητα των αποτελεσμάτων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή των Yildiz et al. (2025), οι οποίοι επικεντρώνονται αποκλειστικά στη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών. Η μελέτη τους εξετάζει διαφορετικές κατανομές βαρών μεταξύ τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών κριτηρίων και αξιολογεί τον βαθμό επίδρασης κάθε ομάδας στο τελικό αποτέλεσμα. Για τον σκοπό αυτό εφαρμόζεται ανάλυση ευαισθησίας, μέσω της οποίας μεταβάλλονται σταδιακά τα βάρη των κριτηρίων και επανυπολογίζεται ο δείκτης καταλληλότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα τεχνικά κριτήρια, και ιδιαίτερα η ηλιακή ακτινοβολία και η απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, εμφανίζουν τη μεγαλύτερη επιρροή στη διαμόρφωση του τελικού χάρτη καταλληλότητας. Παράλληλα, διαπιστώνεται ότι οι περιοχές που χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα κατάλληλες παραμένουν σε μεγάλο βαθμό σταθερές ακόμη και όταν μεταβάλλονται σημαντικά τα βάρη των κριτηρίων, γεγονός που υποδηλώνει υψηλή αξιοπιστία του μοντέλου.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από τη μελέτη των Malinić et al. (2025), όπου αξιολογούνται διαφορετικά σενάρια ενεργειακού σχεδιασμού με βάση εναλλακτικές στρατηγικές στάθμισης. Οι συγγραφείς καταδεικνύουν ότι η εξέταση πολλαπλών σεναρίων επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κριτηρίων και συμβάλλει στην επιλογή λύσεων που είναι περισσότερο ανθεκτικές σε αλλαγές των παραδοχών του μοντέλου. Επιπλέον, επισημαίνουν ότι η ανάλυση σεναρίων μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο υποστήριξης της συμμετοχικής λήψης αποφάσεων, επιτρέποντας την ενσωμάτωση διαφορετικών προτεραιοτήτων και αντιλήψεων των εμπλεκόμενων φορέων.

Συνολικά, η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της σύγχρονης μεθοδολογίας GIS–MCDM για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Μέσω της σύγκρισης διαφορετικών σχημάτων στάθμισης, της εφαρμογής αναλύσεων ευαισθησίας και της εξέτασης εναλλακτικών προτεραιοτήτων, καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων και η διαμόρφωση περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη διαφάνεια της διαδικασίας σχεδιασμού και συμβάλλει στην επιλογή θέσεων εγκατάστασης που παραμένουν κατάλληλες ακόμη και υπό διαφορετικές συνθήκες και παραδοχές.

4. Μελέτες Περίπτωσης Επιλογή Χωροθέτησης Φωτοβολταϊκών Σταθμών με τη Χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης

4.1. Εθνικό Επίπεδο – Ελλάδα

4.1.1 Εισαγωγή

Η Ελλάδα αποτελεί μία από τις πλέον ευνοημένες ευρωπαϊκές χώρες ως προς το ηλιακό δυναμικό, παρουσιάζοντας υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας σε μεγάλο μέρος της επικράτειας. Η ανάγκη επίτευξης των στόχων της ενεργειακής μετάβασης και η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας έχουν ενισχύσει το ενδιαφέρον για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών με επιστημονικά τεκμηριωμένες μεθοδολογίες. Στο πλαίσιο αυτό, η συνδυαστική αξιοποίηση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων (MCDM) έχει αποτελέσει βασικό εργαλείο υποστήριξης της χωρικής λήψης αποφάσεων.

Στην Ελλάδα έχουν δημοσιευθεί αρκετές μελέτες που εφαρμόζουν μεθοδολογίες GIS–MCDM για την επιλογή κατάλληλων περιοχών εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι σημαντικότερες περιπτώσεις αφορούν τη Ρόδο, την Κάρπαθο, την Κρήτη και τον θαλάσσιο χώρο του Αιγαίου, όπου εξετάζονται διαφορετικά κριτήρια, τεχνικές στάθμισης και διαδικασίες αξιολόγησης.

4.1.2 Μελέτη Περίπτωσης Ρόδου

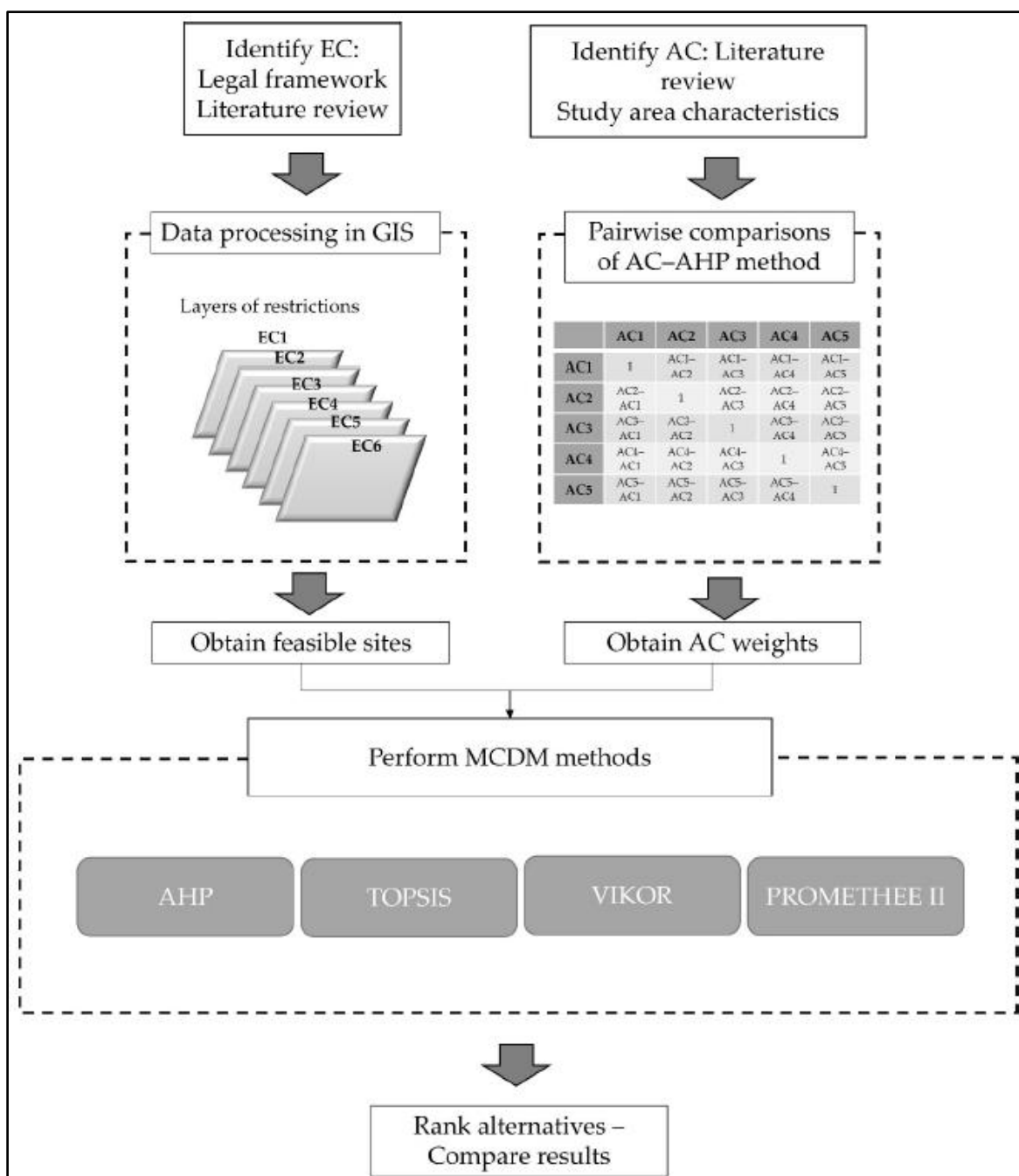
Η μελέτη της Vagiona (2021) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες ελληνικές εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας. Στόχος της έρευνας ήταν η αξιολόγηση και η ιεράρχηση πιθανών θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάρκων στη νήσο Ρόδο, μέσω της συνδυασμένης χρήσης Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και τεσσάρων διαφορετικών μεθόδων πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων (AHP, TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE II). Η μελέτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς δεν περιορίζεται στον εντοπισμό κατάλληλων περιοχών, αλλά προχωρά σε συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μεθοδολογιών MCDM, αναδεικνύοντας τον τρόπο με τον οποίο η επιλογή της μεθόδου επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα.

Η Ρόδος επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης λόγω του ιδιαίτερα υψηλού ηλιακού δυναμικού που διαθέτει, αλλά και εξαιτίας της έντονης παρουσίας περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών, τουριστικών ζωνών και πολιτιστικών μνημείων. Η ύπαρξη αυτών των αντικρουόμενων χρήσεων γης καθιστά τη διαδικασία χωροθέτησης ιδιαίτερα σύνθετη, καθώς απαιτείται εξισορρόπηση μεταξύ ενεργειακής ανάπτυξης και προστασίας του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος.

Η μεθοδολογία της έρευνας αναπτύχθηκε σε δύο διαδοχικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο εφαρμόστηκε χωρική ανάλυση GIS για τον εντοπισμό των εφικτών περιοχών εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών. Αρχικά δημιουργήθηκαν θεματικά επίπεδα πληροφοριών που αφορούσαν περιβαλλοντικούς, τεχνικούς και χωροταξικούς περιορισμούς και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν κριτήρια αποκλεισμού σύμφωνα με το ελληνικό θεσμικό πλαίσιο και τη διεθνή βιβλιογραφία. Μεταξύ των βασικών περιορισμών περιλαμβάνονταν οι περιοχές Natura 2000, οι αρχαιολογικοί χώροι, τα αεροδρόμια, οι εκτάσεις υψηλής γεωργικής παραγωγικότητας, οι περιοχές μεγάλου υψομέτρου καθώς και οι εκτάσεις που δεν διέθεταν το ελάχιστο απαιτούμενο εμβαδόν για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού πάρκου. Μετά την εφαρμογή των περιορισμών προέκυψαν οι εναλλακτικές περιοχές που θεωρήθηκαν χωρικά κατάλληλες για περαιτέρω αξιολόγηση.

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των εναλλακτικών περιοχών μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η έρευνα χρησιμοποίησε κριτήρια τεχνικού, οικονομικού και περιβαλλοντικού χαρακτήρα, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η κλίση του εδάφους, το υψόμετρο και οι χρήσεις γης. Τα κριτήρια αυτά θεωρήθηκαν καθοριστικά για την τεχνική βιωσιμότητα και το οικονομικό κόστος των επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

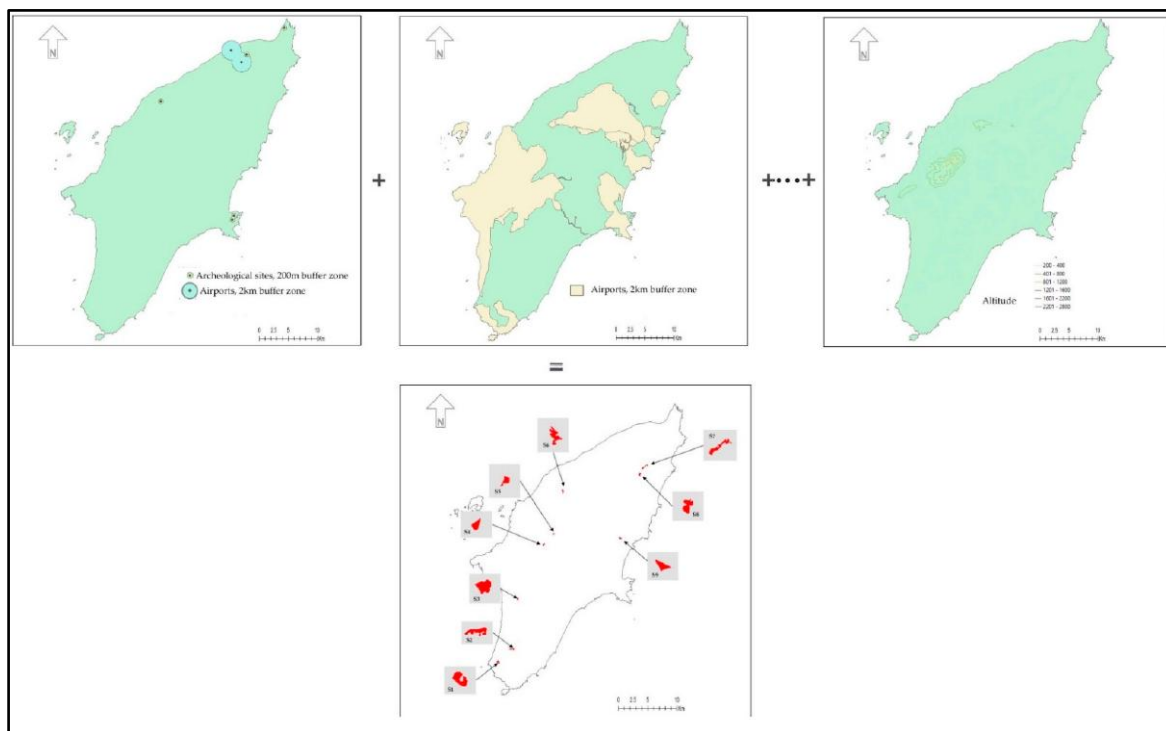
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η συγγραφέας δεν αρκέστηκε σε μία μόνο μέθοδο αξιολόγησης, αλλά συνέκρινε τέσσερις από τις πλέον διαδεδομένες τεχνικές MCDM. Η μέθοδος AHP βασίστηκε σε συγκρίσεις ανά ζεύγη για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων, ενώ οι TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE II χρησιμοποιήθηκαν για την κατάταξη των εναλλακτικών θέσεων. Με τον τρόπο αυτό εξετάστηκε κατά πόσο διαφορετικές προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα χωροθέτησης.



Εικόνα 11. Μεθοδολογικός σχεδιασμός

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι οι μέθοδοι TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE II κατέληξαν στην ίδια βέλτιστη περιοχή εγκατάστασης (S2), ενώ ως δεύτερη καλύτερη επιλογή ανέδειξαν την περιοχή S1. Αντίθετα, η μέθοδος AHP κατέταξε πρώτη την περιοχή S4, η οποία στις υπόλοιπες μεθόδους βρισκόταν σημαντικά χαμηλότερα στην τελική κατάταξη. Η διαφοροποίηση αυτή καταδεικνύει ότι η επιλογή της μεθόδου

πολυκριτηριακής αξιολόγησης μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και να οδηγήσει σε διαφορετικές προτάσεις χωροθέτησης.



Εικόνα 12. Τελικός χάρτης κατάλληλων περιοχών ή κατάταξης εναλλακτικών θέσεων

Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της μελέτης είναι ότι καμία μέθοδος δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα ανώτερη από τις υπόλοιπες. Κάθε τεχνική διαθέτει διαφορετική μαθηματική λογική και αντιμετωπίζει διαφορετικά τις σχέσεις μεταξύ των κριτηρίων και των εναλλακτικών λύσεων. Για τον λόγο αυτό η συγγραφέας προτείνει τη συνδυασμένη εφαρμογή περισσότερων της μίας μεθόδων, ώστε να αυξάνεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και να μειώνεται η πιθανότητα λήψης αποφάσεων που εξαρτώνται υπερβολικά από τα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης τεχνικής.

Η μελέτη της Ρόδου θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την ελληνική βιβλιογραφία, καθώς αποδεικνύει ότι η ολοκληρωμένη ενσωμάτωση GIS και MCDM αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο υποστήριξης χωρικών αποφάσεων για έργα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Παράλληλα, αναδεικνύει ότι η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνικό ζήτημα, αλλά μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί ταυτόχρονη συνεκτίμηση περιβαλλοντικών, κοινωνικών, οικονομικών και χωροταξικών παραγόντων. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα

εφαρμογής πολυκριτηριακής ανάλυσης στον ελληνικό χώρο και συχνά χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς σε μεταγενέστερες μελέτες χωροθέτησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

4.1.3 Μελέτη Περίπτωσης Καρπάθου

Η μελέτη των Bertsiou et al. (2025) αποτελεί μία από τις πλέον πρόσφατες ελληνικές εφαρμογές πολυκριτηριακής χωρικής ανάλυσης για τη χωροθέτηση έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε νησιωτικό περιβάλλον. Αντικείμενο της έρευνας ήταν η αξιολόγηση της καταλληλότητας του νησιού της Καρπάθου για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων, με στόχο τη διερεύνηση των δυνατοτήτων ενεργειακής μετάβασης ενός απομονωμένου νησιωτικού συστήματος προς ένα πιο βιώσιμο και ενεργειακά αυτόνομο μοντέλο ανάπτυξης.

Η επιλογή της Καρπάθου ως περιοχής μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των γεωμορφολογικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών του νησιού. Η Κάρπαθος διαθέτει σημαντικό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τόσο σε ηλιακή όσο και σε αιολική ενέργεια, ωστόσο ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, προστατευόμενες φυσικές περιοχές, περιορισμένη διαθεσιμότητα γης και αυξημένες περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Οι παράγοντες αυτοί καθιστούν τη διαδικασία χωροθέτησης ιδιαίτερα σύνθετη και αναδεικνύουν την ανάγκη εφαρμογής προηγμένων εργαλείων λήψης αποφάσεων.

Η μεθοδολογία της έρευνας βασίστηκε στον συνδυασμό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), της μεθόδου Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP) και της μεθόδου Σταθμισμένου Γραμμικού Συνδυασμού (Weighted Linear Combination – WLC). Αρχικά συγκεντρώθηκαν και οργανώθηκαν σε περιβάλλον GIS όλα τα απαραίτητα χωρικά δεδομένα που σχετίζονταν με τις τεχνικές, περιβαλλοντικές και χωροταξικές παραμέτρους του προβλήματος. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος AHP για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη, ενώ η τελική σύνθεση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω σταθμισμένης χωρικής επικάλυψης.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της μελέτης είναι η συστηματική διάκριση μεταξύ κριτηρίων καταλληλότητας και περιοριστικών παραγόντων (constraints). Οι περιορισμοί χρησιμοποιήθηκαν για τον αποκλεισμό περιοχών στις οποίες η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν επιτρέπεται ή θεωρείται μη αποδεκτή. Στους

περιορισμούς περιλαμβάνονταν προστατευόμενες περιοχές Natura 2000, αρχαιολογικοί χώροι, οικισμοί, δασικές εκτάσεις, περιοχές ιδιαίτερης οικολογικής αξίας και άλλες ζώνες θεσμικής προστασίας. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε αρχικά ένας χάρτης εφικτών περιοχών εγκατάστασης πριν από την εφαρμογή της πολυκριτηριακής αξιολόγησης.

Για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων εξετάστηκαν δέκα βασικά κριτήρια. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονταν η ηλιακή ακτινοβολία, η κλίση του εδάφους, το υψόμετρο, οι χρήσεις γης, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο μεταφοράς, η απόσταση από οικισμούς και άλλες τεχνικές και περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση και τη βιωσιμότητα των επενδύσεων. Η επιλογή των κριτηρίων βασίστηκε στη διεθνή βιβλιογραφία και στις ιδιαίτερες συνθήκες του νησιού.

Ιδιαίτερη σημασία αποδόθηκε στη διαδικασία υπολογισμού των βαρών των κριτηρίων. Μέσω της AHP οι ειδικοί αξιολόγησαν τη σχετική σημασία κάθε παραμέτρου και κατασκεύασαν πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη. Από την ανάλυση προέκυψε ότι η ηλιακή ακτινοβολία και η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο αποτελούν τα σημαντικότερα τεχνικά κριτήρια, ενώ ακολουθούν η κλίση του εδάφους και οι χρήσεις γης. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τα ευρήματα αντίστοιχων διεθνών μελετών χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών, στις οποίες το ενεργειακό δυναμικό και η δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο θεωρούνται οι κυριότεροι παράγοντες επιτυχούς ανάπτυξης φωτοβολταϊκών έργων.

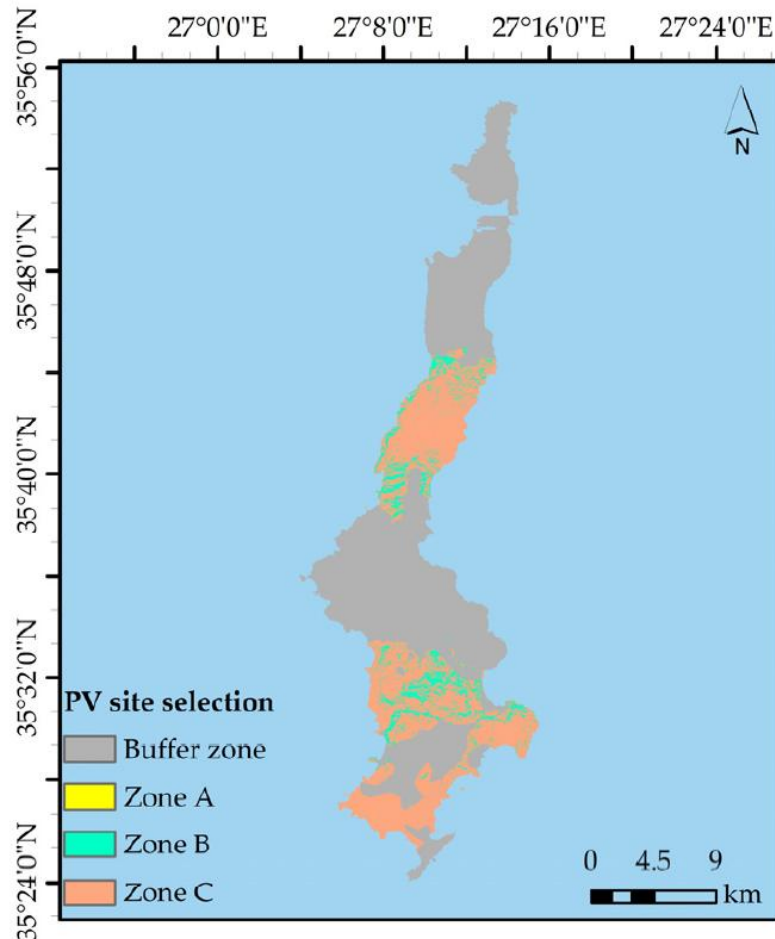
Μετά τον υπολογισμό των βαρών πραγματοποιήθηκε η παραγωγή του τελικού δείκτη καταλληλότητας μέσω της μεθόδου Weighted Linear Combination. Κάθε θεματικό επίπεδο τυποποιήθηκε σε κοινή κλίμακα καταλληλότητας και στη συνέχεια πολλαπλασιάστηκε με το αντίστοιχο βάρος του. Η χωρική επικάλυψη όλων των σταθμισμένων επιπέδων οδήγησε στη δημιουργία του τελικού χάρτη καταλληλότητας, ο οποίος ταξινομήθηκε σε κατηγορίες πολύ υψηλής, υψηλής, μέτριας, χαμηλής και μηδενικής καταλληλότητας.



Εικόνα 13. Μεθοδολογικό διάγραμμα GIS–AHP–WLC της μελέτης

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι σημαντικό ποσοστό της συνολικής έκτασης της Καρπάθου αποκλείεται εξ αρχής λόγω περιβαλλοντικών και θεσμικών περιορισμών. Οι πλέον κατάλληλες περιοχές για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών εντοπίστηκαν κυρίως σε περιοχές με σχετικά ήπιες κλίσεις, υψηλό ηλιακό δυναμικό και μικρή απόσταση από το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίθετα, οι ορεινές περιοχές του νησιού και οι

περιοχές που εμπίπτουν σε καθεστώς προστασίας παρουσίασαν πολύ χαμηλή ή μηδενική καταλληλότητα.



Εικόνα 14. Χάρτης τελικής καταλληλότητας φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην Κάρπαθο

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία της μελέτης είναι η εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας (Sensitivity Analysis). Οι συγγραφείς διερεύνησαν κατά πόσο οι μεταβολές των βαρών των κριτηρίων επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα χωροθέτησης. Η ανάλυση έδειξε ότι, παρότι παρατηρούνται τοπικές διαφοροποιήσεις στις τιμές καταλληλότητας, οι περιοχές που χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα κατάλληλες παραμένουν σε μεγάλο βαθμό σταθερές. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι το μοντέλο παρουσιάζει υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και ανθεκτικότητας σε μεταβολές των παραδοχών.

Η μελέτη των Bertsiou et al. (2025) παρουσιάζει ιδιαίτερη αξία για την ελληνική βιβλιογραφία, καθώς αποτελεί ένα από τα πιο σύγχρονα παραδείγματα εφαρμογής GIS–AHP–WLC σε νησιωτικό περιβάλλον. Επιπλέον, εισάγει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση

που συνδυάζει χωρική ανάλυση, πολυκριτηριακή αξιολόγηση και ανάλυση ευαισθησίας, παρέχοντας ένα ισχυρό πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων για τον ενεργειακό σχεδιασμό και τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα.

4.1.4 Μελέτη Περίπτωσης Υπεράκτιων Φωτοβολταϊκών στο Αιγαίο Πέλαγος (Vagiona et al., 2022)

Η εργασία των αποτελεί μία από τις πρώτες ολοκληρωμένες εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη χωροθέτηση υπεράκτιων φωτοβολταϊκών (Offshore Solar Farms – OSFs) στη Μεσόγειο και ειδικότερα στο Αιγαίο Πέλαγος. Η μελέτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς επεκτείνει τις κλασικές μεθοδολογίες GIS–MCDM από το χερσαίο περιβάλλον στο θαλάσσιο χώρο, εξετάζοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης πλωτών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε ελληνικές θαλάσσιες περιοχές.

Η βασική επιδίωξη των συγγραφέων ήταν ο εντοπισμός και η ιεράρχηση των πλέον κατάλληλων θαλάσσιων περιοχών για εγκατάσταση υπεράκτιων φωτοβολταϊκών, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και ενεργειακούς παράγοντες. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο λήψης αποφάσεων βασισμένο στον συνδυασμό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDM).

Η μεθοδολογία οργανώθηκε σε δύο διακριτές φάσεις. Στην πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε ο χωρικός αποκλεισμός ακατάλληλων περιοχών μέσω GIS, ενώ στη δεύτερη εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα πολυκριτηριακής αξιολόγησης για την ιεράρχηση των εναλλακτικών θέσεων. Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποίησε αντικειμενική στάθμιση μέσω της μεθόδου Entropy Weight Method (EWM), ενώ το δεύτερο βασίστηκε στην υποκειμενική στάθμιση μέσω της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP). Και στις δύο περιπτώσεις η τελική κατάταξη πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο TOPSIS.

Μεθοδολογική προσέγγιση

Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης αφορούσε τον καθορισμό κριτηρίων αποκλεισμού (constraints). Οι συγγραφείς δημιούργησαν θεματικά επίπεδα GIS που περιελάμβαναν:

- προστατευόμενες περιοχές,
- στρατιωτικές ζώνες,
- υδατοκαλλιέργειες,

- θαλάσσιες οδούς ναυσιπλοΐας,
- περιοχές παραχώρησης υδρογονανθράκων,
- περιοχές σχεδιαζόμενων ενεργειακών έργων,
- ελάχιστες αποστάσεις από την ακτογραμμή,
- μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος νερού,
- ελάχιστη και μέγιστη έκταση εγκατάστασης.

Με τη διαδικασία χωρικής επικάλυψης (overlay analysis) αποκλείστηκαν όλες οι περιοχές που δεν πληρούσαν τις παραπάνω προϋποθέσεις. Η διαδικασία αυτή αντιστοιχεί ουσιαστικά στο στάδιο των περιορισμών (constraints analysis) που χρησιμοποιείται στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές GIS–MCDM για φωτοβολταϊκά έργα.

Στη συνέχεια αξιολογήθηκαν επτά βασικά κριτήρια καταλληλότητας:

- Βάθος νερού.
- Απόσταση από την ακτογραμμή.
- Εγγύτητα σε δίκτυα υψηλής τάσης.
- Απόσταση από λιμένες.
- Εξυπηρετούμενος πληθυσμός.
- Ηλιακή ακτινοβολία.
- Διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης.

Τα κριτήρια αυτά επιλέχθηκαν επειδή επηρεάζουν άμεσα τόσο το τεχνικό κόστος εγκατάστασης όσο και τη συνολική ενεργειακή απόδοση των υπεράκτιων φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Στάθμιση κριτηρίων

Η μελέτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι συγκρίνει δύο διαφορετικές φιλοσοφίες στάθμισης.

Στο αντικειμενικό μοντέλο (Entropy Weight Method), τα σημαντικότερα κριτήρια αναδείχθηκαν:

- η εγγύτητα στο δίκτυο μεταφοράς,
- η διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης,
- ο εξυπηρετούμενος πληθυσμός.

Αντίθετα, στο υποκειμενικό μοντέλο AHP η μεγαλύτερη βαρύτητα αποδόθηκε:

- στην ηλιακή ακτινοβολία,
- στην πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο,
- στην απόσταση από τους λιμένες.

Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι η τελική κατάταξη μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά ανάλογα με τη μέθοδο στάθμισης που επιλέγεται, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σημασία της ανάλυσης ευαισθησίας στις εφαρμογές GIS–MCDM.

Αποτελέσματα χωρικής ανάλυσης

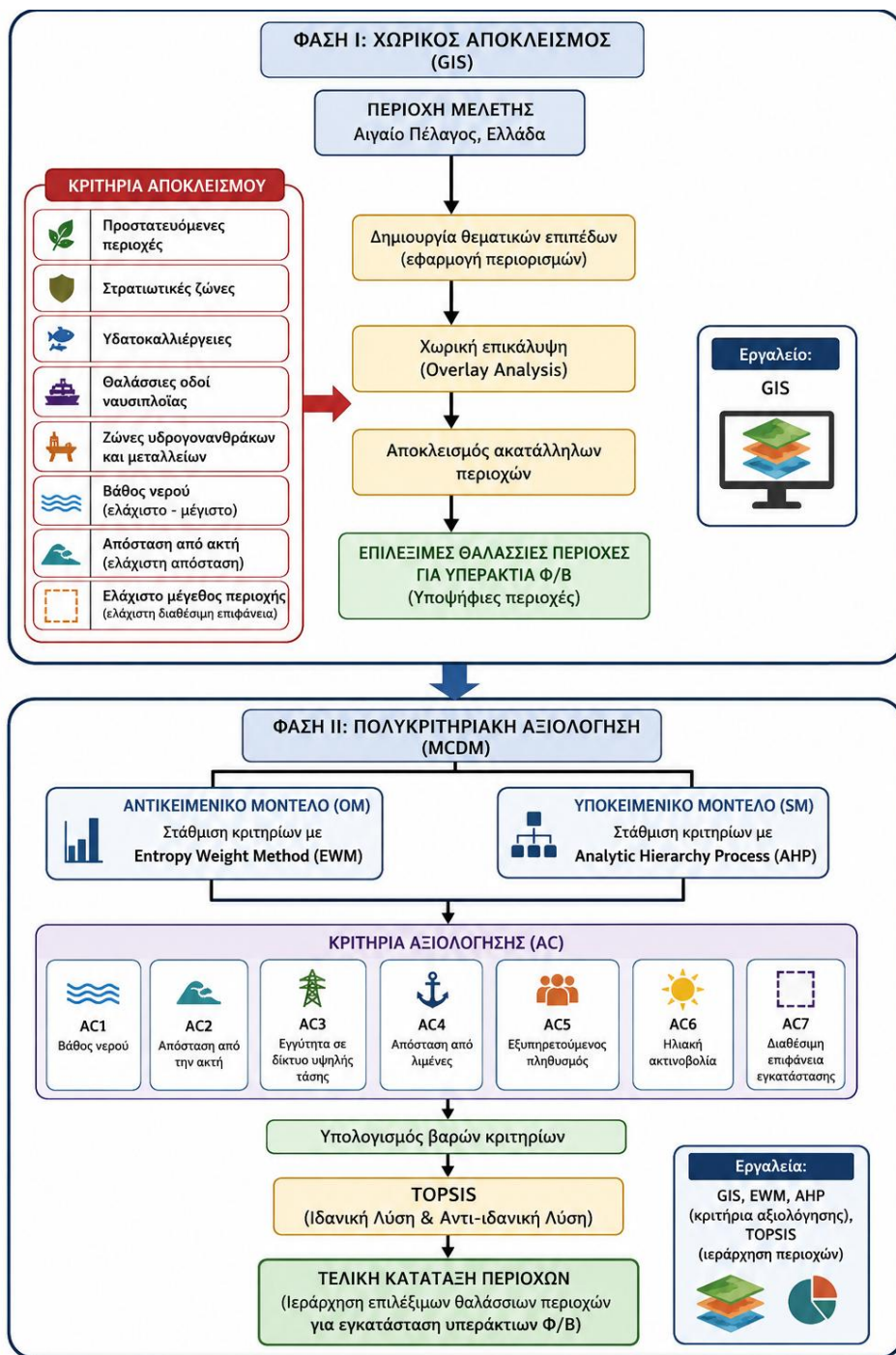
Μετά την εφαρμογή των κριτηρίων αποκλεισμού εντοπίστηκαν εννέα επιλέξιμες θαλάσσιες περιοχές στο Αιγαίο συνολικής έκτασης περίπου 17,25 km². Οι περισσότερες βρίσκονταν στο Βόρειο Αιγαίο, ενώ επιπλέον κατάλληλες περιοχές εντοπίστηκαν ανατολικά της Κρήτης και ανατολικά της Εύβοιας.

Η εφαρμογή της TOPSIS οδήγησε σε διαφορετικές κατατάξεις ανάλογα με το μοντέλο στάθμισης. Ωστόσο, ορισμένες περιοχές παρουσίασαν σταθερά υψηλή καταλληλότητα και στα δύο μοντέλα, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Η εργασία των Vagiona et al. (2022) αποτελεί σημαντικό σταθμό στη βιβλιογραφία της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, διότι:

- εφαρμόζει ολοκληρωμένη προσέγγιση GIS–MCDM σε θαλάσσιο περιβάλλον,
- συνδυάζει GIS, AHP, Entropy Weighting και TOPSIS,
- εισάγει για πρώτη φορά συστηματική αξιολόγηση υπεράκτιων φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα,
- αποδεικνύει τη δυνατότητα μεταφοράς των μεθόδων χωροθέτησης χερσαίων φωτοβολταϊκών σε πλωτές εγκαταστάσεις,

- αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής της μεθόδου στάθμισης στη διαμόρφωση του τελικού δείκτη καταλληλότητας.



Σχήμα 4.Χ. Μεθοδολογικό πλαίσιο χωροθέτησης υπερακτινών φωτοβολταϊκών σταθμών στο Αιγαίο Πέλαγος. Προσαρμογή από Vagiona et al. (2022).

4.2. Μεσογειακές Χώρες

4.2.1 Νοτιοανατολική Ισπανία – Cartagena

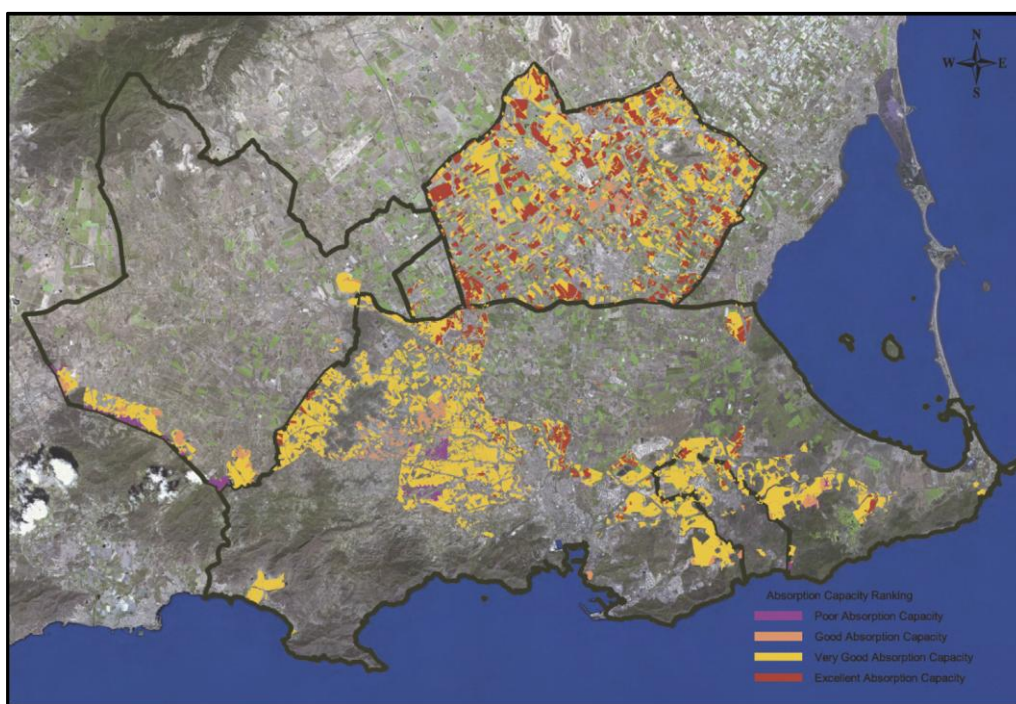
Η μελέτη των Sánchez-Lozano et al. (2013) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και πλέον αναφερόμενες εφαρμογές συνδυασμού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDM) για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών στη Μεσόγειο. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Cartagena, στη νοτιοανατολική Ισπανία, μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό και έντονο ενδιαφέρον για επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Στόχος της μελέτης ήταν η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου χωρικού μοντέλου που θα επέτρεπε τον εντοπισμό των πλέον κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω της συνδυασμένης αξιοποίησης χωρικών δεδομένων και πολυκριτηριακών τεχνικών αξιολόγησης.

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε σε δύο διαδοχικές φάσεις. Στην πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε ο αποκλεισμός των ακατάλληλων περιοχών με βάση χωροταξικούς, περιβαλλοντικούς και τεχνικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί προέκυψαν κυρίως από τη σχετική νομοθεσία και περιλάμβαναν προστατευόμενες περιοχές, υδάτινα σώματα, οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα, ορεινούς όγκους και άλλες εκτάσεις στις οποίες η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών δεν ήταν επιτρεπτή ή θεωρούνταν μη βιώσιμη. Μέσω του GIS δημιουργήθηκαν θεματικά επίπεδα πληροφορίας (layers) για κάθε περιοριστικό παράγοντα και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε χωρική επικάλυψη, ώστε να προσδιοριστούν οι περιοχές που παρέμεναν διαθέσιμες για περαιτέρω αξιολόγηση.

Στη δεύτερη φάση εφαρμόστηκε πολυκριτηριακή ανάλυση για την αξιολόγηση των εναπομεινουσών περιοχών. Οι συγγραφείς διαμόρφωσαν ένα σύνολο κριτηρίων που κάλυπτε τις βασικές διαστάσεις της χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών. Τα κριτήρια οργανώθηκαν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: χωροθετικά, γεωμορφολογικά, περιβαλλοντικά και κλιματικά. Μεταξύ των σημαντικότερων παραμέτρων περιλαμβάνονταν η ηλιακή ακτινοβολία, η απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η απόσταση από το οδικό δίκτυο, η κλίση του εδάφους, το υψόμετρο και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί.

Για τη στάθμιση των κριτηρίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Analytic Hierarchy Process (AHP), η οποία επέτρεψε τον υπολογισμό των σχετικών βαρών μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη. Η μέθοδος αυτή παρείχε τη δυνατότητα να εκφραστεί ποσοτικά η σχετική σημασία κάθε κριτηρίου στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στη συνέχεια, για την αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων εφαρμόστηκε η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), η οποία κατατάσσει τις υποψήφιες περιοχές με βάση την εγγύτητά τους στην ιδανική λύση και την απόστασή τους από την αντι-ιδανική λύση. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η ιεράρχηση των διαθέσιμων θέσεων ως προς την καταλληλότητά τους για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανέδειξαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα χωροθέτησης, γεγονός αναμενόμενο για εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παράλληλα, ιδιαίτερα υψηλή βαρύτητα αποδόθηκε στην απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το κόστος σύνδεσης επηρεάζει σημαντικά τη βιωσιμότητα μιας επένδυσης. Επιπλέον, η προσβασιμότητα μέσω του οδικού δικτύου και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους συνέβαλαν ουσιαστικά στη διαφοροποίηση των περιοχών ως προς τον βαθμό καταλληλότητάς τους.



Σχήμα 4.9. Τελική χωρική κατάταξη περιοχών ως προς την ικανότητα απορρόφησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην περιοχή Cartagena της Ισπανίας.

Το τελικό προϊόν της μελέτης ήταν ένας αναλυτικός χάρτης καταλληλότητας, στον οποίο το σύνολο της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκε σε κατηγορίες διαφορετικής καταλληλότητας για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών. Η χαρτογραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων επέτρεψε τον άμεσο εντοπισμό των βέλτιστων περιοχών και κατέδειξε τη χρησιμότητα του συνδυασμού GIS–AHP–TOPSIS ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων στον ενεργειακό σχεδιασμό. Η συγκεκριμένη εργασία θεωρείται πλέον κλασική στη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς αποτέλεσε πρότυπο για μεγάλο αριθμό μεταγενέστερων ερευνών που εφάρμοσαν παρόμοιες μεθοδολογίες χωροθέτησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε διάφορες περιοχές της Μεσογείου και του κόσμου.

4.2.2 Ιταλία – Χερσόνησος Gargano, Περιφέρεια Απουλίας

Η μελέτη των Neri et al. (2025) αποτελεί μία από τις πλέον σύγχρονες εφαρμογές ολοκληρωμένης πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη χωροθέτηση αγροβολταϊκών συστημάτων (agrivoltaics), συνδυάζοντας Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) με τεχνικές Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων (MCDM). Σε αντίθεση με πολλές προηγούμενες έρευνες που επικεντρώνονται αποκλειστικά στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάρκων, η συγκεκριμένη προσέγγιση ενσωματώνει παράλληλα τις ανάγκες της γεωργικής παραγωγής και των Ενεργειακών Κοινοτήτων (Renewable Energy Communities – RECs), επιδιώκοντας τη βέλτιστη αξιοποίηση της γης για παραγωγή τόσο τροφίμων όσο και ενέργειας. Η περιοχή εφαρμογής βρίσκεται στη χερσόνησο Gargano της περιφέρειας Απουλίας (Puglia) στη νότια Ιταλία και περιλαμβάνει τους δήμους Chieuti, Lesina και Serracapriola.

Η μεθοδολογία της μελέτης βασίζεται σε μία διαδοχική διαδικασία αποκλεισμού ακατάλληλων περιοχών, αξιολόγησης των εναπομενουσών εκτάσεων και τελικής κατάταξής τους ως προς την καταλληλότητα εγκατάστασης αγροβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά, εφαρμόστηκαν περιορισμοί (constraints) που αφορούσαν προστατευόμενες περιοχές, υδατορεύματα, ιστορικούς χώρους, οδικές υποδομές και άλλες χρήσεις γης που δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη ενεργειακών εγκαταστάσεων. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στη δημιουργία ενός αρχικού χάρτη εφικτών περιοχών εγκατάστασης.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν εννέα βασικά κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία αντιπροσωπεύουν τόσο τα φυσικά χαρακτηριστικά του χώρου όσο και παραμέτρους προσβασιμότητας και ενεργειακής υποδομής. Τα κριτήρια αυτά ήταν το υψόμετρο (Elevation), η κλίση του

εδάφους (Slope), ο προσανατολισμός των πρανών (Aspect), η οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiance – GHI), η μέση θερμοκρασία, η εγγύτητα σε αστικά κέντρα, η εγγύτητα στο οδικό δίκτυο, η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο και η απόσταση από ποτάμια και υδατορεύματα. Τα δεδομένα προήλθαν από ανοικτές γεωχωρικές βάσεις δεδομένων και επεξεργάστηκαν στο περιβάλλον QGIS.

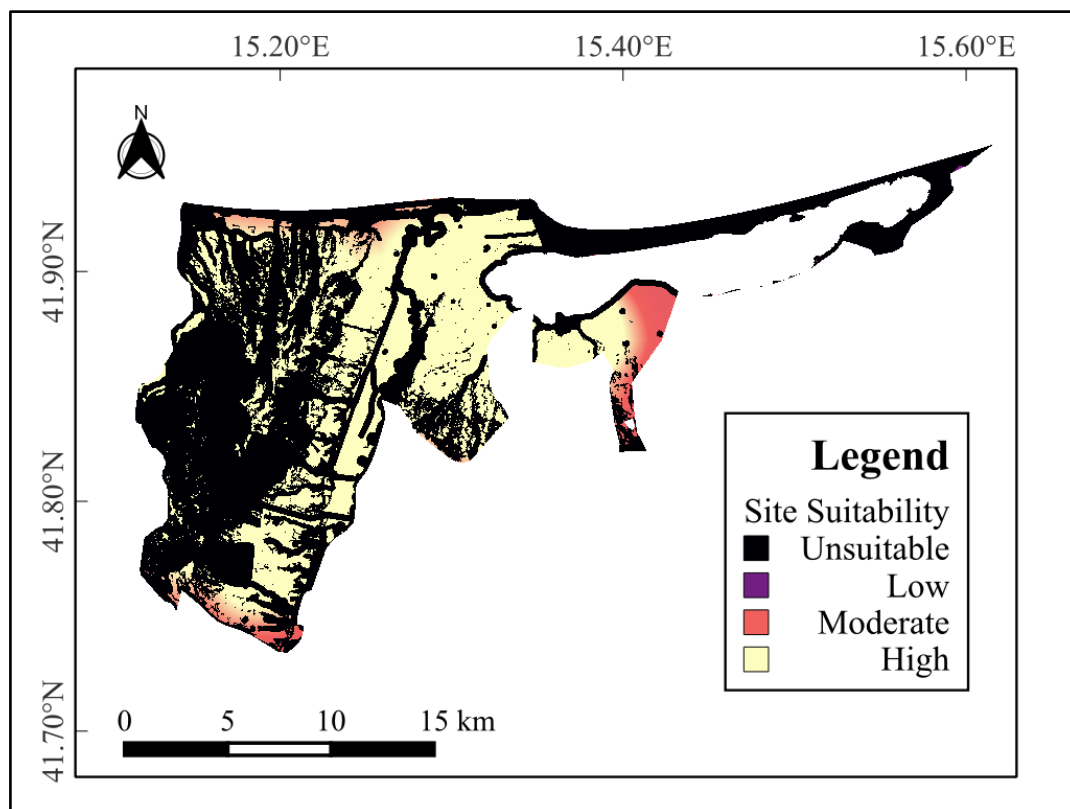
Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η μέθοδος στάθμισης που υιοθετήθηκε. Οι συγγραφείς δεν χρησιμοποίησαν αποκλειστικά μία υποκειμενική ή αντικειμενική τεχνική, αλλά συνδύασαν τη μέθοδο Best-Worst Method (BWM) με τη μέθοδο Entropy. Η πρώτη αξιοποιεί την κρίση ειδικών για την εκτίμηση της σχετικής σημαντικότητας των κριτηρίων, ενώ η δεύτερη υπολογίζει αντικειμενικά βάρη βάσει της διακύμανσης των δεδομένων. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συνδυάστηκαν σε ένα ενιαίο σύνολο «συμβιβαστικών βαρών» (compromised weights), επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ εμπειρικής γνώσης και αντικειμενικής πληροφορίας.

Τα τελικά βάρη ανέδειξαν ως σημαντικότερο κριτήριο την ηλιακή ακτινοβολία (C4), η οποία έλαβε βάρος περίπου 0,31. Ακολούθησαν η μέση θερμοκρασία (C5) με βάρος 0,19 και η εγγύτητα στο ηλεκτρικό δίκτυο (C8) με βάρος 0,13. Αντίθετα, μικρότερη επίδραση εμφάνισαν η εγγύτητα σε ποτάμια (C9) και η εγγύτητα στο οδικό δίκτυο (C7). Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η ενεργειακή απόδοση και η δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες επιλογής θέσεων για αγροβολταϊκά συστήματα.

Μετά τον προσδιορισμό των βαρών, εφαρμόστηκε η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), η οποία κατατάσσει κάθε εναλλακτική θέση με βάση την απόστασή της από την ιδανική και την αντι-ιδανική λύση. Η μέθοδος παρήγαγε μία συνεχή επιφάνεια τιμών καταλληλότητας, η οποία στη συνέχεια ταξινομήθηκε μέσω ανάλυσης ABC σε τρεις κατηγορίες: υψηλή, μέτρια και χαμηλή καταλληλότητα. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε τη δημιουργία του τελικού χάρτη καταλληλότητας για αγροβολταϊκά συστήματα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι περίπου 90,7 km² της περιοχής χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα κατάλληλα για ανάπτυξη αγροβολταϊκών συστημάτων, ενώ 15,8 km² κατατάσσονται ως μέτριας καταλληλότητας και 5,3 km² ως χαμηλής καταλληλότητας. Παράλληλα, 204,1 km² αποκλείστηκαν ως ακατάλληλες εκτάσεις λόγω περιβαλλοντικών, χωροταξικών ή τεχνικών

περιορισμών. Οι περιοχές υψηλής καταλληλότητας εντοπίζονται κυρίως σε εκτεταμένες επίπεδες γεωργικές εκτάσεις με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία, περιορισμένες κλίσεις και μικρή απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο και τις βασικές υποδομές.



Εικόνα 15. Τελικός χάρτης καταλληλότητας για αγροβολαιακά Συστήματα (Χερσόνησος Gargano, Απούλια, Ιταλία)

Η μελέτη των Neri et al. (2025) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς επεκτείνει το κλασικό μοντέλο GIS–MCDM ενσωματώνοντας την έννοια των Ενεργειακών Κοινοτήτων και των αγροβολταϊκών συστημάτων. Η προσέγγιση αυτή μετατοπίζει το επίκεντρο από τη μονοδιάστατη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς μια πολυλειτουργική αξιοποίηση της γης, όπου η ενεργειακή μετάβαση συνδυάζεται με τη διατήρηση της γεωργικής δραστηριότητας και την ενίσχυση της τοπικής ανάπτυξης. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη μελέτη θεωρείται χαρακτηριστικό παράδειγμα της νέας γενιάς εφαρμογών GIS–MCDM για τη βιώσιμη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και αγροβολταϊκών συστημάτων.

4.2.3 Πολωνία – Περιφέρεια Legionowo

Η μελέτη των Mierzwiak και Calka (2017) αποτελεί μία χαρακτηριστική εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών, συνδυάζοντας τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), τη μέθοδο Analytic Hierarchy Process (AHP) και τη μέθοδο Weighted Linear Combination (WLC). Η περιοχή μελέτης ήταν η Περιφέρεια Legionowo στην κεντρική Πολωνία, μία περιοχή με αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες λόγω της πληθυσμιακής ανάπτυξης και της γειτνίασης με τη Βαρσοβία. Στόχος της έρευνας ήταν η ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τον εντοπισμό των καταλληλότερων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάρκων μικρής κλίμακας.

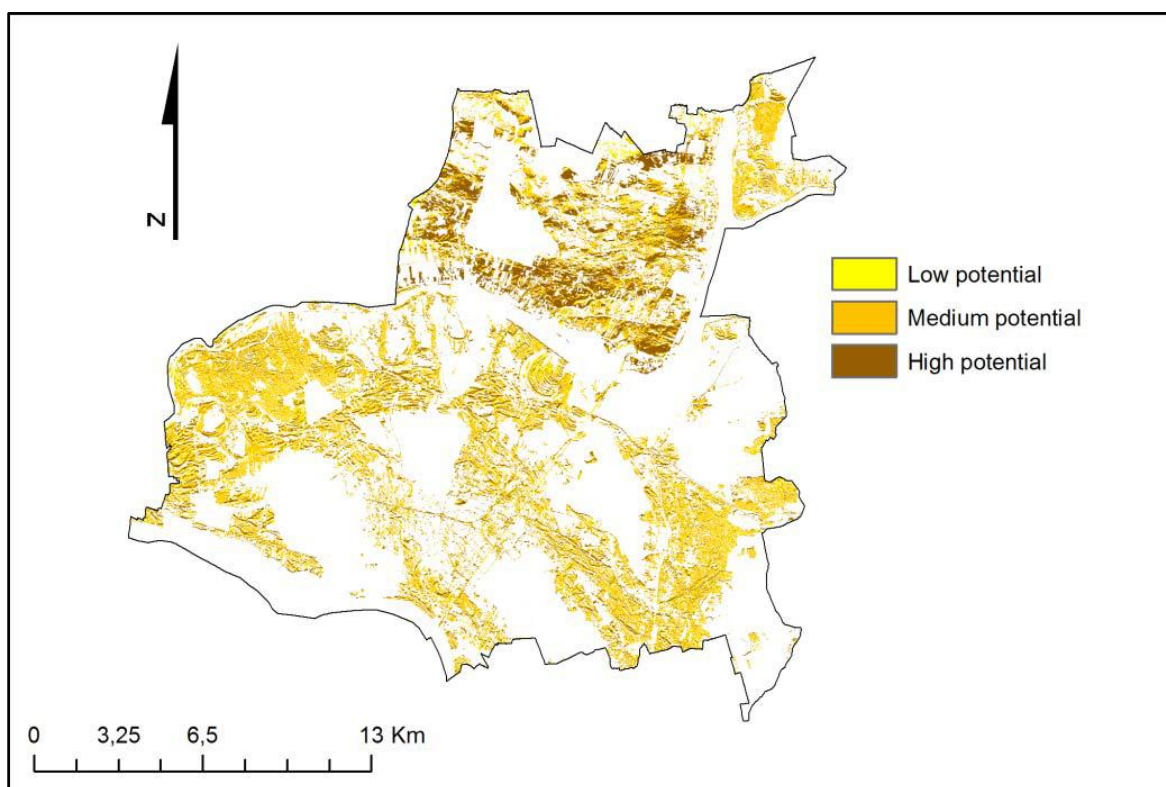
Η μεθοδολογία βασίσθηκε σε μια διαδικασία δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο εφαρμόστηκαν περιοριστικά κριτήρια (hard criteria) μέσω Boolean ανάλυσης, αποκλείοντας εκτάσεις στις οποίες η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών θεωρήθηκε αδύνατη ή ανεπιθύμητη. Στις περιοχές αυτές περιλαμβάνονταν δάση, μόνιμες καλλιέργειες, υγράτοποι, υδάτινα σώματα, δομημένες περιοχές καθώς και προστατευόμενες εκτάσεις Natura 2000. Στο δεύτερο στάδιο αξιολογήθηκαν οι εναπομείνουσες περιοχές μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπου χρησιμοποιήθηκαν τόσο περιβαλλοντικά όσο και τεχνικά κριτήρια.

Τα βασικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η ηλιακή ακτινοβολία, ο προσανατολισμός του εδάφους (aspect), η απόσταση από οικιστικές περιοχές, η απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η απόσταση από το οδικό δίκτυο. Τα δύο πρώτα θεωρήθηκαν περιβαλλοντικά κριτήρια, ενώ τα υπόλοιπα τεχνικά κριτήρια που επηρεάζουν το κόστος σύνδεσης και πρόσβασης στις εγκαταστάσεις. Οι συγγραφείς τόνισαν ότι η επιλογή των κριτηρίων προέκυψε από εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση και από το ισχύον ευρωπαϊκό και εθνικό νομοθετικό πλαίσιο.

Για τον υπολογισμό της σχετικής σημασίας των κριτηρίων εφαρμόστηκε η μέθοδος AHP. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προσανατολισμός του εδάφους ήταν το σημαντικότερο κριτήριο με βάρος 41%, ενώ ακολουθούσε η ηλιακή ακτινοβολία με 38%. Η απόσταση από τους οικισμούς έλαβε βάρος 11%, η απόσταση από τις γραμμές μεταφοράς 7% και η απόσταση από το οδικό δίκτυο μόλις 3%. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει ότι οι φυσικογεωγραφικές συνθήκες επηρεάζουν πολύ περισσότερο την καταλληλότητα μιας θέσης από ό,τι οι τεχνικές παράμετροι πρόσβασης.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος Weighted Linear Combination (WLC), μέσω της οποίας τα σταθμισμένα κριτήρια συνδυάστηκαν σε έναν ενιαίο δείκτη καταλληλότητας. Η τεχνική αυτή επέτρεψε τη δημιουργία θεματικών χαρτών καταλληλότητας και την ταξινόμηση της περιοχής μελέτης σε τρεις κατηγορίες: χαμηλή, μέτρια και υψηλή καταλληλότητα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι περίπου το 60% της συνολικής έκτασης αποκλείστηκε εξαρχής λόγω περιβαλλοντικών και χωροταξικών περιορισμών. Από το υπόλοιπο τμήμα της περιοχής, το 23% ταξινομήθηκε ως μέτριας καταλληλότητας, το 12% ως υψηλής καταλληλότητας και το 5% ως χαμηλής καταλληλότητας. Οι καταλληλότερες περιοχές εντοπίστηκαν στο βόρειο τμήμα της περιφέρειας, όπου οι κλίσεις και ο προσανατολισμός του εδάφους ευνοούν τη μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 16. Χάρτης καταλληλότητας περιοχών για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών μετά την εφαρμογή της μεθόδου AHP-WLC

Σε τελικό στάδιο οι συγγραφείς ενσωμάτωσαν επιπλέον οικονομικά κριτήρια, όπως το μέγεθος και το σχήμα των διαθέσιμων αγροτεμαχίων. Θεωρήθηκε ότι μία έκταση περίπου 2 ha αποτελεί το βέλτιστο μέγεθος για επένδυση μικρής κλίμακας. Μετά την εφαρμογή όλων των φίλτρων επιλέχθηκαν 47 θέσεις που πληρούσαν τα τεχνικά, περιβαλλοντικά και

οικονομικά κριτήρια. Οι θέσεις αυτές αντιστοιχούσαν περίπου στο 3% της συνολικής έκτασης της περιφέρειας και χαρακτηρίστηκαν ως οι βέλτιστες περιοχές για ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Η συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία, καθώς αποτελεί ένα από τα πρώτα ολοκληρωμένα παραδείγματα συνδυασμού GIS–AHP–WLC για χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Επιπλέον, εισάγει μια σαφή διαδικασία δύο σταδίων, όπου προηγείται ο αποκλεισμός ακατάλληλων περιοχών και ακολουθεί η πολυκριτηριακή αξιολόγηση των εναπομεινάντων εκτάσεων. Η λογική αυτή έχει υιοθετηθεί σε πλήθος μεταγενέστερων μελετών καταλληλότητας και αποτελεί σήμερα μία από τις επικρατέστερες προσεγγίσεις στη χωροθέτηση έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

4.2.4 Τουρκία – Επιλογή Θέσεων Πλωτών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων με GIS–FAHP

Η μελέτη των Karipoğlu, Koca και İlbarhar (2024) εξετάζει τη χωροθέτηση πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων (Floating Photovoltaics – FPV) στην Τουρκία μέσω συνδυασμού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της μεθόδου Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). Η έρευνα επικεντρώνεται σε τρεις μεγάλες λίμνες της χώρας, τη λίμνη Beyşehir, τη λίμνη Tuz και τη λίμνη Van, με στόχο τον εντοπισμό των καταλληλότερων περιοχών για εγκατάσταση πλωτών φωτοβολταϊκών σταθμών. Η συγκεκριμένη προσέγγιση διαφοροποιείται από τις περισσότερες μελέτες της βιβλιογραφίας, καθώς δεν εξετάζει χερσαίες εγκαταστάσεις αλλά φωτοβολταϊκά συστήματα τοποθετημένα σε υδάτινες επιφάνειες, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη βελτίωση της απόδοσης των πάνελ και τη μείωση των συγκρούσεων χρήσεων γης.

Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι τα πλωτά φωτοβολταϊκά αποτελούν μία ανερχόμενη τεχνολογία διεθνώς, με σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τα τελευταία χρόνια. Η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω σε πλωτές πλατφόρμες συμβάλλει όχι μόνο στην παραγωγή καθαρής ενέργειας αλλά και στη μείωση των απωλειών νερού λόγω εξάτμισης, ενώ παράλληλα βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση των πλαισίων εξαιτίας της ψυκτικής επίδρασης του νερού. Οι λόγοι αυτοί καθιστούν τα FPV ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για χώρες με μεγάλες υδάτινες επιφάνειες, όπως η Τουρκία.

Η μεθοδολογία της έρευνας βασίσθηκε στην αξιολόγηση τριών βασικών ομάδων κριτηρίων: τεχνικών, περιβαλλοντικών–κοινωνικών και κριτηρίων προσβασιμότητας. Για τον καθορισμό της σχετικής βαρύτητας των κριτηρίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Fuzzy AHP, η οποία επιτρέπει τη διαχείριση της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τις ανθρώπινες κρίσεις και θεωρείται εξέλιξη της κλασικής AHP. Οι συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν από οκτώ ειδικούς με εμπειρία στον τομέα της ηλιακής ενέργειας και της περιβαλλοντικής διαχείρισης.

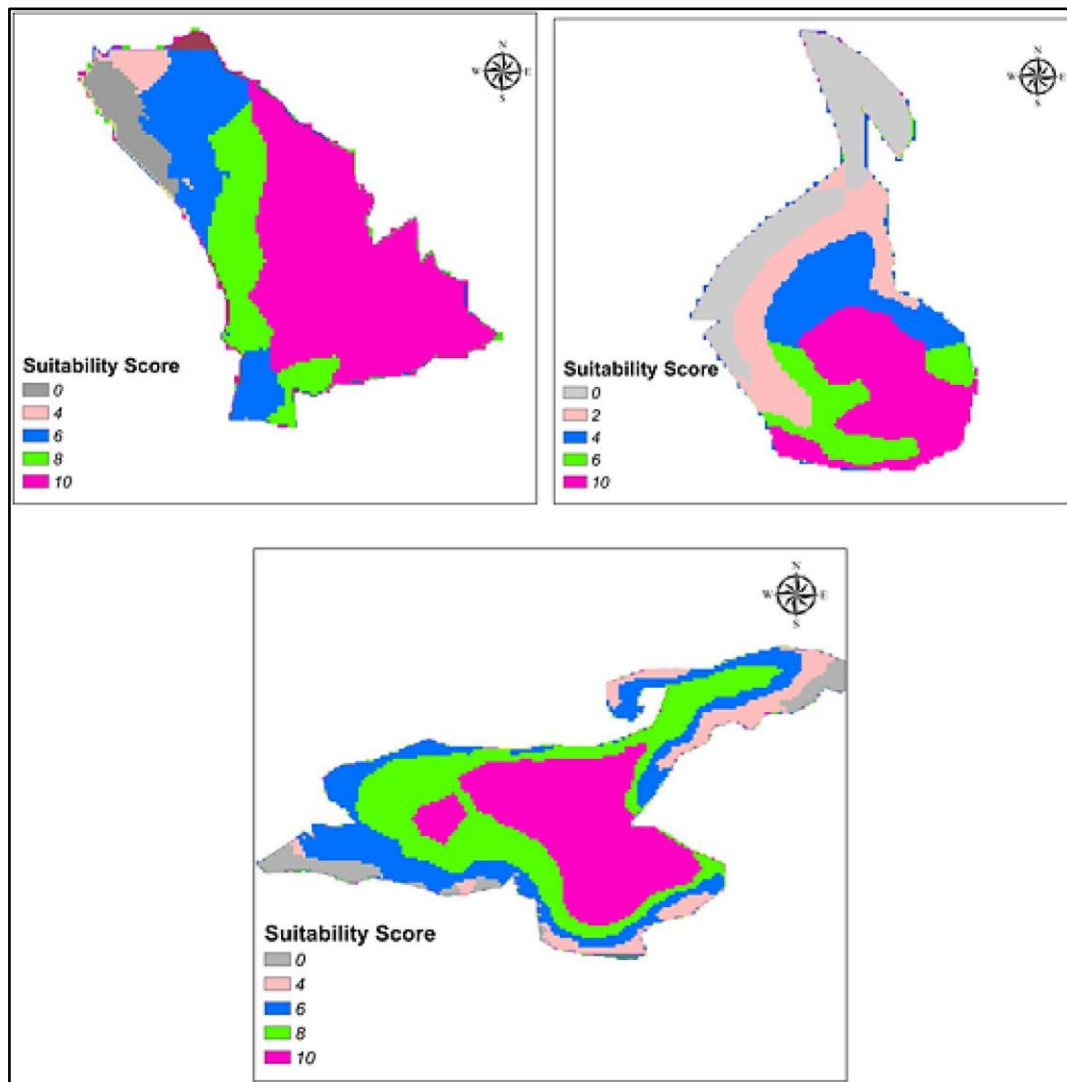
Συνολικά αξιολογήθηκαν δέκα υποκριτήρια. Στα τεχνικά κριτήρια περιλαμβάνονταν η παγκόσμια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiance – GHI), το υψόμετρο και η διαθέσιμη επιφάνεια νερού. Στα περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια εξετάστηκαν η απόσταση από δασικές εκτάσεις, η απόσταση από προστατευόμενες περιοχές, οι ανθρώπινες δραστηριότητες και οι πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα των υδάτων. Τέλος, στα κριτήρια προσβασιμότητας περιλαμβάνονταν η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο, η απόσταση από το οδικό δίκτυο και η απόσταση από τη χερσαία ζώνη.

Η ανάλυση FAHP έδειξε ότι το σημαντικότερο κριτήριο ήταν η παγκόσμια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία (GHI), η οποία έλαβε βάρος 46,8%. Ακολούθησε η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο με βάρος 12,5%, ενώ μικρότερη βαρύτητα αποδόθηκε στο υψόμετρο (9,3%), στις πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα των υδάτων (8,7%) και στη διαθέσιμη επιφάνεια της λίμνης (6,6%). Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι η ενεργειακή απόδοση του συστήματος αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα κατά την επιλογή θέσεων εγκατάστασης πλωτών φωτοβολταϊκών σταθμών.

Μετά τον υπολογισμό των βαρών, όλα τα θεματικά επίπεδα πληροφορίας ενσωματώθηκαν στο GIS και δημιουργήθηκαν χάρτες καταλληλότητας για κάθε κριτήριο. Η διαδικασία περιλάμβανε επαναταξινόμηση των δεδομένων σε πέντε κατηγορίες καταλληλότητας, από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή, και στη συνέχεια σύνθεση των επιμέρους χαρτών σε έναν τελικό χάρτη καταλληλότητας μέσω σταθμισμένης επικάλυψης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η λίμνη Beyşehir παρουσίασε το υψηλότερο ποσοστό κατάλληλων περιοχών για εγκατάσταση πλωτών φωτοβολταϊκών, συγκεντρώνοντας περίπου το 52% των πλέον κατάλληλων εκτάσεων μεταξύ των τριών λιμνών που εξετάστηκαν. Η λίμνη Van διέθετε τη μεγαλύτερη συνολική έκταση κατάλληλων περιοχών, όμως αναλογικά η Beyşehir αναδείχθηκε ως η βέλτιστη επιλογή. Αντίθετα, η λίμνη Tuz

παρουσίασε μικρότερη καταλληλότητα λόγω περιορισμών που σχετίζονται με περιβαλλοντικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Ως εκ τούτου, οι συγγραφείς προτείνουν τη λίμνη Beyşehir ως την καταλληλότερη θέση για την πρώτη μεγάλη εφαρμογή πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος στην Τουρκία.



Εικόνα 17. Τελικός χάρτης καταλληλότητας εγκατάστασης πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η συμβολή της συγκεκριμένης μελέτης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα εργασία, καθώς αποδεικνύει ότι η συνδυαστική χρήση GIS και FAHP μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία όχι μόνο στη χωροθέτηση χερσαίων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων αλλά και σε πλωτά συστήματα. Επιπλέον, αναδεικνύει την ανάγκη προσαρμογής των κριτηρίων χωροθέτησης στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε ενεργειακού έργου, καθώς οι παράγοντες

που επηρεάζουν τα πλωτά φωτοβολταϊκά διαφέρουν σημαντικά από εκείνους που εφαρμόζονται στις συμβατικές χερσαίες εγκαταστάσεις.

4.2.5 Ισπανία – Βέλτιστη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών με GIS και Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Η μελέτη των de Luis-Ruiz, Salas-Menocal, Pereda-García, Pérez-Álvarez, Sedano-Cibrián και Ruiz-Fernández (2024) παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας μέσω συνδυασμού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (Multi-Criteria Analysis – MCA). Η έρευνα εφαρμόζεται στην περιοχή της Κανταβρίας στη βόρεια Ισπανία και έχει ως κύριο στόχο την ανάπτυξη μιας αντικειμενικής και επαναλήψιμης διαδικασίας εντοπισμού των καταλληλότερων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάρκων. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η επιλογή θέσης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την ενεργειακή απόδοση όσο και τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα ενός φωτοβολταϊκού έργου.

Σε αντίθεση με πολλές προηγούμενες μελέτες, οι οποίες βασίζονται σε υποκειμενική στάθμιση των κριτηρίων, η συγκεκριμένη έρευνα επιχειρεί να αναπτύξει ένα πιο συνεκτικό και στατιστικά τεκμηριωμένο σύστημα αξιολόγησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιοποιεί την Πολυκριτηριακή Ανάλυση σε συνδυασμό με τη μέθοδο Analytic Hierarchy Process (AHP) του Saaty, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον έλεγχο της συνέπειας των βαρών μέσω του δείκτη Consistency Ratio (CR). Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η διαδικασία αυτή μειώνει σημαντικά τον βαθμό υποκειμενικότητας που χαρακτηρίζει αρκετές εφαρμογές πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Η μεθοδολογία βασίσθηκε στην αξιολόγηση δέκα κριτηρίων, τα οποία ταξινομήθηκαν σε τρεις βασικές κατηγορίες: ενεργειακά, γεωγραφικά και περιβαλλοντικά κριτήρια. Τα ενεργειακά κριτήρια περιλάμβαναν τη θερμοκρασία, τον προσανατολισμό του εδάφους, τη σχετική υγρασία, τη νεφοκάλυψη και το γεωγραφικό πλάτος. Τα γεωγραφικά κριτήρια περιλάμβαναν την κλίση του εδάφους, την απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο, την προσβασιμότητα μέσω οδικού δικτύου και τη χρήση γης. Τέλος, τα περιβαλλοντικά κριτήρια αφορούσαν την παρουσία προστατευόμενων περιοχών, οι οποίες λειτουργούσαν ως περιοχές αποκλεισμού από τη διαδικασία χωροθέτησης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος ποσοτικοποίησης των κλιματικών παραμέτρων. Για τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη νεφοκάλυψη δεν χρησιμοποιήθηκαν απλές ετήσιες μέσες τιμές, αλλά αναπτύχθηκαν σύνθετοι δείκτες βασισμένοι σε μετρήσεις τριών χαρακτηριστικών ωρών της ημέρας (07:00, 13:00 και 18:00) για όλους τους μήνες του έτους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την καλύτερη αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τις ώρες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

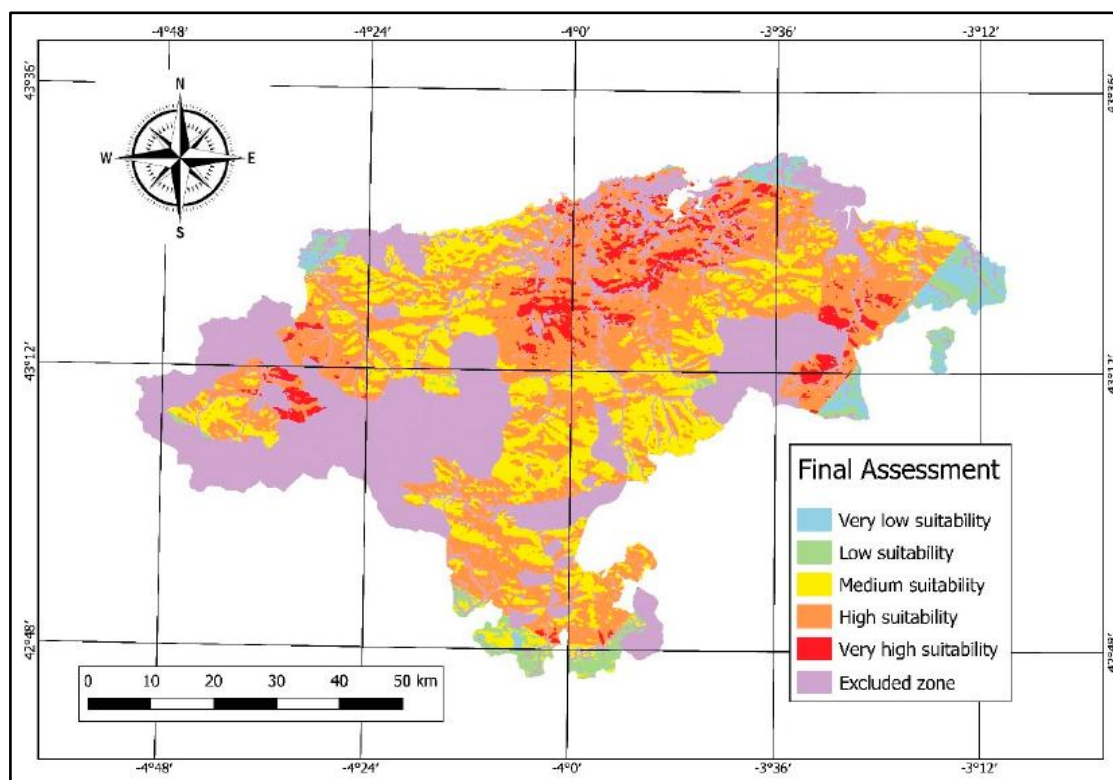
Η χωρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον GIS μέσω δημιουργίας θεματικών επιπέδων πληροφορίας για κάθε κριτήριο. Για την παραγωγή των χαρτών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών της ισπανικής μετεωρολογικής υπηρεσίας (AEMET), ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DTM), δεδομένα ηλεκτρικών δικτύων υψηλής τάσης (>60 kV), οδικών δικτύων, χρήσεων γης και προστατευόμενων περιοχών. Κάθε κριτήριο ταξινομήθηκε σε πέντε επίπεδα καταλληλότητας, από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή καταλληλότητα, ενώ οι περιοχές αποκλεισμού έλαβαν τιμή μηδέν.

Για τη στάθμιση των κριτηρίων εφαρμόστηκε η μέθοδος AHP μέσω πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη. Μετά από πέντε διαδοχικές επαναλήψεις υπολογίστηκαν τα τελικά βάρη των κριτηρίων. Η θερμοκρασία αναδείχθηκε ως το σημαντικότερο κριτήριο με βάρος 25,54%, ενώ ακολούθησαν το γεωγραφικό πλάτος και οι προστατευόμενες περιοχές με ποσοστό 17,13% έκαστο. Ο προσανατολισμός και η νεφοκάλυψη έλαβαν βάρος 11,19%, η υγρασία 5,63%, η χρήση γης 4,89%, ενώ η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο, η προσβασιμότητα και η κλίση του εδάφους παρουσίασαν μικρότερα βάρη μεταξύ 2,13% και 2,58%.

Πριν από την τελική εφαρμογή της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε έλεγχος συνέπειας των συγκρίσεων. Ο υπολογισμός του Consistency Ratio έδωσε τιμή 2,76%, η οποία είναι σημαντικά μικρότερη από το αποδεκτό όριο του 10%, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των βαρών που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο.

Στο τελικό στάδιο όλα τα θεματικά επίπεδα ενσωματώθηκαν σε διαδικασία σταθμισμένης επικάλυψης (Weighted Overlay Analysis), δημιουργώντας έναν ενιαίο χάρτη καταλληλότητας. Ο χάρτης αυτός κατατάσσει το σύνολο της περιοχής μελέτης σε ζώνες διαφορετικού βαθμού καταλληλότητας για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πλέον κατάλληλες περιοχές εντοπίζονται κυρίως στο νότιο τμήμα της Κανταβρίας, όπου συνδυάζονται ευνοϊκές θερμοκρασιακές συνθήκες,

χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη, περιορισμένη νεφοκάλυψη και μικρότερες περιβαλλοντικές δεσμεύσεις. Αντίθετα, οι βόρειες και ορεινές περιοχές της περιφέρειας χαρακτηρίστηκαν από χαμηλότερη καταλληλότητα λόγω δυσμενέστερων κλιματικών και τοπογραφικών συνθηκών.



Εικόνα 18. Τελικός χάρτης καταλληλότητας χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών

Η συμβολή της μελέτης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς παρουσιάζει μία πλήρως τεκμηριωμένη εφαρμογή GIS–AHP για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, αναδεικνύει τη σημασία της αντικειμενικής στάθμισης των κριτηρίων και της αξιολόγησης της συνέπειας των συγκρίσεων, στοιχεία τα οποία αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά και της μεθοδολογίας που υιοθετείται στην παρούσα έρευνα.

4.3. Διεθνές Επίπεδο

4.3.1 Ιράν – Επιλογή Κατάλληλων Θέσεων Υπόγειων Φραγμάτων με GIS και Ασαφή Λογική

Η μελέτη των Koohbanani, Barati, Yazdani, Sakhdari και Jomemanzari (2018) εξετάζει τη δυνατότητα εντοπισμού κατάλληλων θέσεων για την κατασκευή υπόγειων φραγμάτων

(subsurface dams) μέσω της συνδυασμένης χρήσης Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic). Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στη λεκάνη Sarakhs της επαρχίας Khorasan Razavi στο βορειοανατολικό Ιράν, μία περιοχή ημιάνυδρου κλίματος που αντιμετωπίζει έντονα προβλήματα υπερεκμετάλλευσης υπόγειων υδατικών πόρων και μείωσης της στάθμης των υδροφορέων. Στόχος της μελέτης ήταν η ανάπτυξη ενός χωρικού μοντέλου υποστήριξης αποφάσεων που να επιτρέπει την επιλογή κατάλληλων θέσεων για την κατασκευή υπόγειων φραγμάτων σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν επαρκή ποσοτικά δεδομένα αλλά κυριαρχεί η εμπειρική γνώση των ειδικών.

Οι συγγραφείς υπογραμμίζουν ότι τα υπόγεια φράγματα αποτελούν μία ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνική διαχείρισης υδατικών πόρων στις άνυδρες και ημιάνυδρες περιοχές, καθώς επιτρέπουν την αποθήκευση νερού εντός των υδροφορέων περιορίζοντας σημαντικά τις απώλειες λόγω εξάτμισης. Επιπλέον, παρουσιάζουν μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με τα επιφανειακά φράγματα, προσφέρουν καλύτερη προστασία της ποιότητας του νερού και μπορούν να συμβάλουν στην τεχνητή αναπλήρωση των υπόγειων υδροφορέων. Ωστόσο, η επιτυχία τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ορθή επιλογή της θέσης εγκατάστασης, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση χωρικών εργαλείων ανάλυσης.

Η περιοχή μελέτης καλύπτει έκταση περίπου 1.926 km² και χαρακτηρίζεται από μέση ετήσια βροχόπτωση μόλις 186 mm, υψηλή εξατμισοδιαπνοή και συνεχή υποβάθμιση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων. Σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης, η περιοχή παρουσιάζει σημαντική πτώση της στάθμης του υδροφορέα τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της εντατικής άντλησης, ενώ παράλληλα παρατηρείται επιδείνωση της ποιότητας του υπόγειου νερού λόγω αύξησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC). Οι συνθήκες αυτές καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή τεχνικών τεχνητής εμπλουτισμού και αποθήκευσης νερού.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου χωροθέτησης χρησιμοποιήθηκαν έξι βασικά κριτήρια αξιολόγησης: η γεωλογία, οι χρήσεις και καλύψεις γης (Land Use/Land Cover), η απόσταση από υφιστάμενους υδατικούς πόρους, η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, η απόσταση από οικισμούς και η κλίση του εδάφους. Τα δεδομένα προήλθαν από γεωλογικούς χάρτες, δορυφορικές εικόνες Landsat 8, ψηφιακά μοντέλα εδάφους και θεματικά χωρικά επίπεδα που αφορούσαν το υδρογραφικό δίκτυο και τις υδροληψίες της περιοχής.

Σε αντίθεση με τις συμβατικές πολυκριτηριακές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν απόλυτες κατηγορίες καταλληλότητας, η συγκεκριμένη μελέτη αξιοποίησε την ασαφή λογική (Fuzzy Logic), η οποία επιτρέπει τη βαθμιαία μετάβαση μεταξύ κατάλληλων και ακατάλληλων περιοχών. Κάθε κριτήριο μετατράπηκε σε ασαφές σύνολο μέσω σιγμοειδών συναρτήσεων συμμετοχής (Sigmoidal Membership Functions), με τιμές που κυμαίνονταν από 0 έως 1. Τιμές κοντά στο 0 αντιστοιχούσαν σε χαμηλή καταλληλότητα, ενώ τιμές κοντά στο 1 υποδείκνυαν ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες για την κατασκευή υπόγειων φραγμάτων.

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε διαδοχικά στάδια. Αρχικά δημιουργήθηκαν τα θεματικά επίπεδα πληροφορίας και στη συνέχεια κάθε επίπεδο τυποποιήθηκε μέσω ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής. Για παράδειγμα, μικρές κλίσεις εδάφους έλαβαν υψηλές τιμές καταλληλότητας, καθώς ευνοούν τη διήθηση και την αποθήκευση νερού, ενώ οι μεγάλες κλίσεις θεωρήθηκαν λιγότερο κατάλληλες. Παρόμοια προσέγγιση εφαρμόστηκε και για τις αποστάσεις από ρέματα, οικισμούς και υδατικούς πόρους. Τέλος, όλα τα επίπεδα συνδυάστηκαν μέσω διαδικασίας ασαφούς επικάλυψης (Fuzzy Overlay) για τη δημιουργία του τελικού χάρτη καταλληλότητας.

Ιδιαίτερη σημασία αποδόθηκε στις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες. Οι σχηματισμοί ταξινομήθηκαν σε κλίμακα καταλληλότητας από 1 έως 9 με βάση τη διαπερατότητα και το δυναμικό αποθήκευσης νερού. Αντίστοιχα, οι χρήσεις γης αξιολογήθηκαν σύμφωνα με τη δυνατότητα υποστήριξης έργων υπόγειων φραγμάτων, με τις κοίτες ποταμών να λαμβάνουν τις υψηλότερες βαθμολογίες καταλληλότητας και τις αστικές περιοχές τις χαμηλότερες.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό της λεκάνης απορροής διαθέτει πολύ υψηλή καταλληλότητα για την κατασκευή υπόγειων φραγμάτων. Συγκεκριμένα, περίπου το 9% της συνολικής έκτασης της λεκάνης παρουσίασε βαθμό καταλληλότητας μεταξύ 0,8 και 1, τιμές που αντιστοιχούν στις πλέον ευνοϊκές περιοχές για την υλοποίηση παρόμοιων έργων. Οι περιοχές αυτές εντοπίζονται κυρίως κατά μήκος των κύριων υδρογραφικών αξόνων και σε θέσεις όπου συνδυάζονται μικρές κλίσεις, ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες και επαρκής απόσταση από υφιστάμενες υδροληψίες και οικισμούς.

Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής σε περιβάλλον GIS αποτελεί ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο χωρικής λήψης αποφάσεων σε περιπτώσεις όπου η διαθεσιμότητα αναλυτικών δεδομένων είναι

περιορισμένη. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση τόσο ποσοτικών δεδομένων όσο και εμπειρικής γνώσης των ειδικών, βελτιώνοντας σημαντικά την αξιοπιστία της διαδικασίας χωροθέτησης υδροτεχνικών έργων. Παράλληλα, οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες περιβαλλοντικές και χωροταξικές εφαρμογές που απαιτούν πολυκριτηριακή αξιολόγηση.

4.3.2 Εκουαδόρ (Νήσοι Γκαλαπάγκος) – Πολυκριτηριακή Ανάλυση για τη Χωροθέτηση Αιολικών και Φωτοβολταϊκών Σταθμών με GIS, AHP και OWA

Η μελέτη των Villacreses, Jijón, Nicolalde, Martínez-Gómez και Betancourt (2023) διερευνά τη βέλτιστη χωροθέτηση αιολικών και φωτοβολταϊκών σταθμών στα νησιά Γκαλαπάγκος του Εκουαδόρ, μέσω της συνδυασμένης χρήσης Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Making – MCDM). Η έρευνα αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της πολιτικής «Zero Fossil Fuel in Galápagos», η οποία αποσκοπεί στη σταδιακή απεξάρτηση των νησιών από τα ορυκτά καύσιμα και στη μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα μηδενικών εκπομπών άνθρακα.

Τα νησιά Γκαλαπάγκος αποτελούν μία από τις σημαντικότερες προστατευόμενες περιοχές παγκοσμίως, καθώς έχουν ανακηρυχθεί Μνημείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO λόγω της μοναδικής βιοποικιλότητάς τους. Παράλληλα όμως, η αύξηση του πληθυσμού και της τουριστικής δραστηριότητας έχει οδηγήσει σε αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, οι οποίες καλύπτονταν επί δεκαετίες από θερμοηλεκτρικές μονάδες που λειτουργούν με ντίζελ. Η χρήση ορυκτών καυσίμων έχει συνδεθεί με επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα, καθώς και στη χλωρίδα και πανίδα των νησιών, γεγονός που κατέστησε αναγκαία τη διερεύνηση εναλλακτικών ενεργειακών λύσεων.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες που παρουσιάζονται στη μελέτη, το αιολικό και το ηλιακό δυναμικό των Γκαλαπάγκος είναι ιδιαίτερα υψηλό. Η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία φθάνει τα 6,1 kWh/m²/day στη νήσο San Cristóbal, ενώ στη νήσο Baltra η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου ανέρχεται σε περίπου 6,36 m/s. Οι τιμές αυτές καθιστούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ικανές να καλύψουν πολλαπλάσια της υφιστάμενης ενεργειακής ζήτησης των νησιών.

Η μεθοδολογία της έρευνας βασίστηκε στη συνδυασμένη εφαρμογή GIS, της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (Analytic Hierarchy Process – AHP) και της μεθόδου Ordered

Weighted Average (OWA). Το GIS χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή, επεξεργασία και χωρική ανάλυση των γεωγραφικών δεδομένων, ενώ η μέθοδος AHP αξιοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της σχετικής βαρύτητας των κριτηρίων. Στη συνέχεια, η μέθοδος OWA χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση των επιμέρους επιπέδων πληροφορίας και τη δημιουργία τελικών χαρτών καταλληλότητας.

Για την αξιολόγηση των κατάλληλων θέσεων χρησιμοποιήθηκαν πέντε κύρια κριτήρια: η ταχύτητα ανέμου ή η ηλιακή ακτινοβολία (ανάλογα με τον τύπο εγκατάστασης), η κλίση του εδάφους, η απόσταση από αστικές περιοχές, η απόσταση από υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας και η απόσταση από το οδικό δίκτυο. Παράλληλα, εισήχθησαν περιορισμοί που αφορούσαν προστατευόμενες περιοχές, λιμνοθάλασσες, μακρόβια οικοσυστήματα, ηφαιστειακούς κινδύνους και ζώνες με ανεπαρκές αιολικό δυναμικό. Όλα τα χωρικά δεδομένα μετατράπηκαν σε μορφή raster με ανάλυση 200×200 m, ώστε να είναι δυνατή η πολυκριτηριακή επεξεργασία τους.

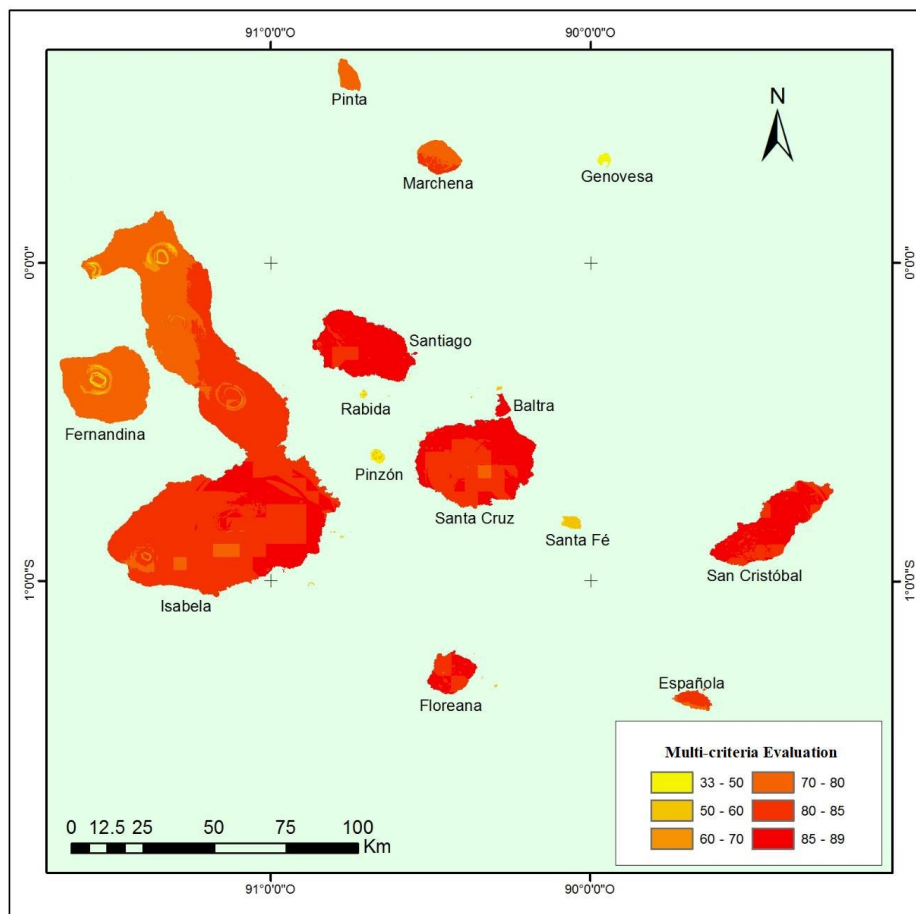
Στο πλαίσιο της μεθόδου AHP πραγματοποιήθηκε σύγκριση ανά ζεύγη κριτηρίων σύμφωνα με την κλίμακα Saaty. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόσταση από τους υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας αποτέλεσε το σημαντικότερο κριτήριο με βάρος 0,354, ακολουθούμενη από την απόσταση από τις αστικές περιοχές με βάρος 0,230 και την απόσταση από το οδικό δίκτυο με βάρος 0,200. Η ηλιακή ακτινοβολία ή η ταχύτητα ανέμου έλαβαν βάρος 0,092, ενώ η κλίση του εδάφους βάρος 0,123. Ο έλεγχος συνέπειας έδωσε δείκτη $CR = 0,04$, τιμή σημαντικά μικρότερη από το αποδεκτό όριο του 0,10, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των εκτιμήσεων των ειδικών.

Μετά τον καθορισμό των βαρών, εφαρμόστηκε η μέθοδος OWA για την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας. Για τις αιολικές εγκαταστάσεις οι τιμές καταλληλότητας κυμάνθηκαν από 14% έως 88%, ενώ για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις από 33% έως 89%. Ως ιδιαίτερα κατάλληλες θεωρήθηκαν οι περιοχές που παρουσίαζαν βαθμό καταλληλότητας μεγαλύτερο του 85%, οι οποίες εντοπίστηκαν κυρίως στα νησιά Baltra, Santa Cruz και San Cristóbal. Για τα φωτοβολταϊκά συστήματα διαπιστώθηκε ότι όλες οι κύριες κατοικημένες νήσοι διαθέτουν επαρκείς εκτάσεις για την εγκατάσταση σταθμών ισχύος έως 10 MW, χωρίς να παραβιάζονται οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί της περιοχής.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει το γεγονός ότι η έρευνα δεν περιορίστηκε στη θεωρητική χωρική ανάλυση, αλλά προχώρησε και σε επιτόπια επαλήθευση (field validation) των

προτεινόμενων θέσεων. Κατά την επιτόπια αξιολόγηση εξετάστηκαν παράγοντες όπως η κατάσταση του οδικού δικτύου, η μορφολογία του εδάφους, η βλάστηση, η παρουσία πτηνών, η τραχύτητα του αναγλύφου και η δυνατότητα πρόσβασης για την κατασκευή και λειτουργία των εγκαταστάσεων. Η διαδικασία αυτή επιβεβαίωσε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του GIS-MCDM μοντέλου και ανέδειξε τη νήσο Baltra ως την πλέον κατάλληλη περιοχή για αιολικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

Οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η ολοκληρωμένη εφαρμογή GIS, AHP και OWA αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τη χωροθέτηση έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη αξιολόγηση τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραγόντων, μειώνοντας την αβεβαιότητα και βελτιώνοντας τη διαφάνεια της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.



Εικόνα 19. Χάρτης πολυκριτηριακής αξιολόγησης καταλληλότητας για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών στα Νησιά Γκαλαπάγκος (GIS-AHP-OWA).

4.3.3 Μελέτη Περίπτωσης Μέκκας, Σαουδική Αραβία

Η μελέτη των Eldamaty et al. (2023) αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής πολυκριτηριακής ανάλυσης με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS-MCDA) για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας στη διοικητική περιφέρεια της Μέκκας στη Σαουδική Αραβία. Στόχος της έρευνας ήταν ο εντοπισμός των καταλληλότερων περιοχών για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά, περιβαλλοντικά και χωροταξικά κριτήρια. Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, της εκτεταμένης γεωγραφικής έκτασης και της αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που καθιστά την ηλιακή ενέργεια στρατηγικής σημασίας για τη βιώσιμη ανάπτυξη της περιοχής.

Η μεθοδολογία βασίσθηκε στη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης γεωχωρικής βάσης δεδομένων GIS και στην εφαρμογή της μεθόδου Weighted Overlay για τη σύνθεση ενός τελικού δείκτη καταλληλότητας. Οι συγγραφείς επέλεξαν επτά βασικά κριτήρια αξιολόγησης, τα οποία ταξινομήθηκαν σε τρεις κύριες κατηγορίες: χωροταξικά κριτήρια (απόσταση από πόλεις και αεροδρόμια, απόσταση από οδικό δίκτυο, απόσταση από ακτογραμμή, απόσταση από ηλεκτρικά δίκτυα), περιβαλλοντικά κριτήρια (ηλιακή ακτινοβολία) και τοπογραφικά κριτήρια (κλίση και προσανατολισμός πρανών). Κάθε κριτήριο έλαβε συγκεκριμένο βάρος συμμετοχής στο τελικό μοντέλο, με την ηλιακή ακτινοβολία να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη βαρύτητα (30%), ακολουθούμενη από την απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο και τον προσανατολισμό του εδάφους (15% έκαστο).

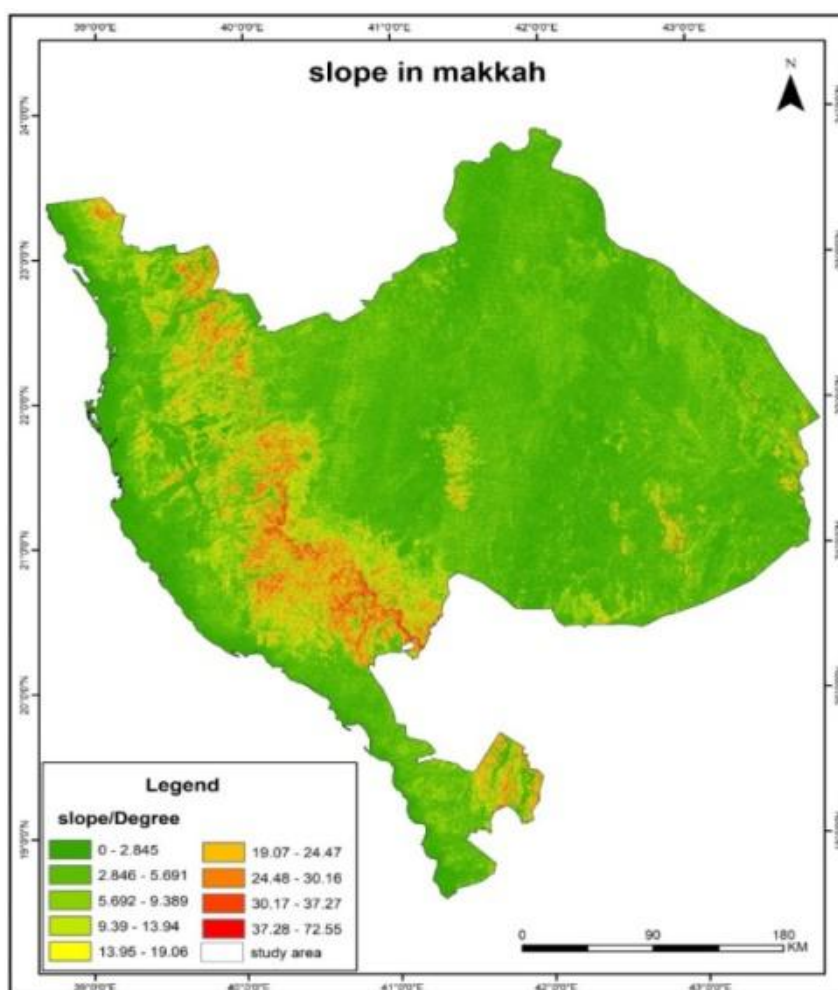
Για κάθε κριτήριο δημιουργήθηκαν θεματικά χωρικά επίπεδα πληροφορίας (raster layers), τα οποία επαναταξινομήθηκαν σε κοινή κλίμακα καταλληλότητας από 1 έως 10. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε σταθμισμένη χωρική επικάλυψη (Weighted Overlay Analysis), μέσω της οποίας υπολογίσθηκε ο συνολικός δείκτης καταλληλότητας για κάθε χωρική μονάδα της περιοχής μελέτης. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε τη σύνθεση των επιμέρους κριτηρίων σε έναν ενιαίο χάρτη καταλληλότητας, ο οποίος αποτυπώνει τη σχετική ελκυστικότητα κάθε περιοχής για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σημαντικό ποσοστό της περιφέρειας της Μέκκας παρουσιάζει υψηλό δυναμικό για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών έργων. Οι περισσότεροι κατάλληλες περιοχές εντοπίστηκαν κυρίως στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης,

όπου συνδυάζονται υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, ήπιες κλίσεις και ικανοποιητική εγγύτητα προς το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, οι λιγότερο κατάλληλες περιοχές συνδέονται κυρίως με μεγάλες κλίσεις, δυσμενή προσανατολισμό ή αυξημένη εγγύτητα σε αστικές περιοχές και αεροδρόμια.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι συγγραφείς δεν περιορίστηκαν μόνο στον υπολογισμό του συνολικού δείκτη καταλληλότητας, αλλά προχώρησαν και στον εντοπισμό περιοχών που συγκεντρώνουν βαθμό καταλληλότητας άνω του 80%. Οι περιοχές αυτές καταλαμβάνουν περίπου 4.000–4.400 km² και αντιστοιχούν σε περίπου 3% των συνολικά κατάλληλων εκτάσεων της διοικητικής περιφέρειας. Οι σημαντικότερες συγκεντρώσεις εντοπίστηκαν στις επαρχίες Taif, Turubah και Raneh, οι οποίες συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των εκτάσεων υψηλής καταλληλότητας.

Η συγκεκριμένη μελέτη αναδεικνύει τη χρησιμότητα των εργαλείων GIS σε συνδυασμό με πολυκριτηριακές τεχνικές λήψης αποφάσεων για την υποστήριξη του ενεργειακού σχεδιασμού σε περιφερειακή κλίμακα. Παρά το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία AHP ή Fuzzy AHP, η έρευνα παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα εφαρμογής της λογικής της σταθμισμένης χωρικής επικάλυψης (Weighted Linear Combination), η οποία αποτελεί τη βάση πολλών σύγχρονων μοντέλων GIS–MCDM για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών. Επιπλέον, η μελέτη επιβεβαιώνει ότι η συνδυαστική αξιολόγηση χωροταξικών, περιβαλλοντικών και τοπογραφικών παραγόντων μπορεί να οδηγήσει στον αξιόπιστο εντοπισμό περιοχών υψηλής ενεργειακής καταλληλότητας, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση των επενδύσεων στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



Εικόνα 20. Τελικός χάρτης βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών στη Μέκκα

4.3.4 Μελέτη Περίπτωσης Σαουδικής Αραβίας

Η διδακτορική διατριβή του Almasad (2022) παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας στη Σαουδική Αραβία, συνδυάζοντας Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), ασαφή πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων (Fuzzy MCDM), τη μέθοδο Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) και τη μέθοδο PROMETHEE II. Σκοπός της έρευνας ήταν ο εντοπισμός των καταλληλότερων περιοχών για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων μεγάλης κλίμακας, μεγιστοποιώντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ταυτόχρονα ελαχιστοποιώντας το κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Η Σαουδική Αραβία επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης λόγω του εξαιρετικά υψηλού ηλιακού δυναμικού της και των εθνικών στόχων για ενεργειακή μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η μελέτη αναδεικνύει ότι η διαδικασία χωροθέτησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: την επιλογή των κριτηρίων αξιολόγησης, την απόδοση βαρών στα κριτήρια και την τελική αξιολόγηση των εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης. Σύμφωνα με τον συγγραφέα, σημαντικό μειονέκτημα της προηγούμενης βιβλιογραφίας αποτελεί η περιορισμένη χρήση κλιματικών παραμέτρων και η έντονη υποκειμενικότητα κατά τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων. Για τον λόγο αυτό προτείνεται η αξιοποίηση της Fuzzy AHP, η οποία επιτρέπει την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας και της ασάφειας στις αξιολογήσεις των ειδικών.

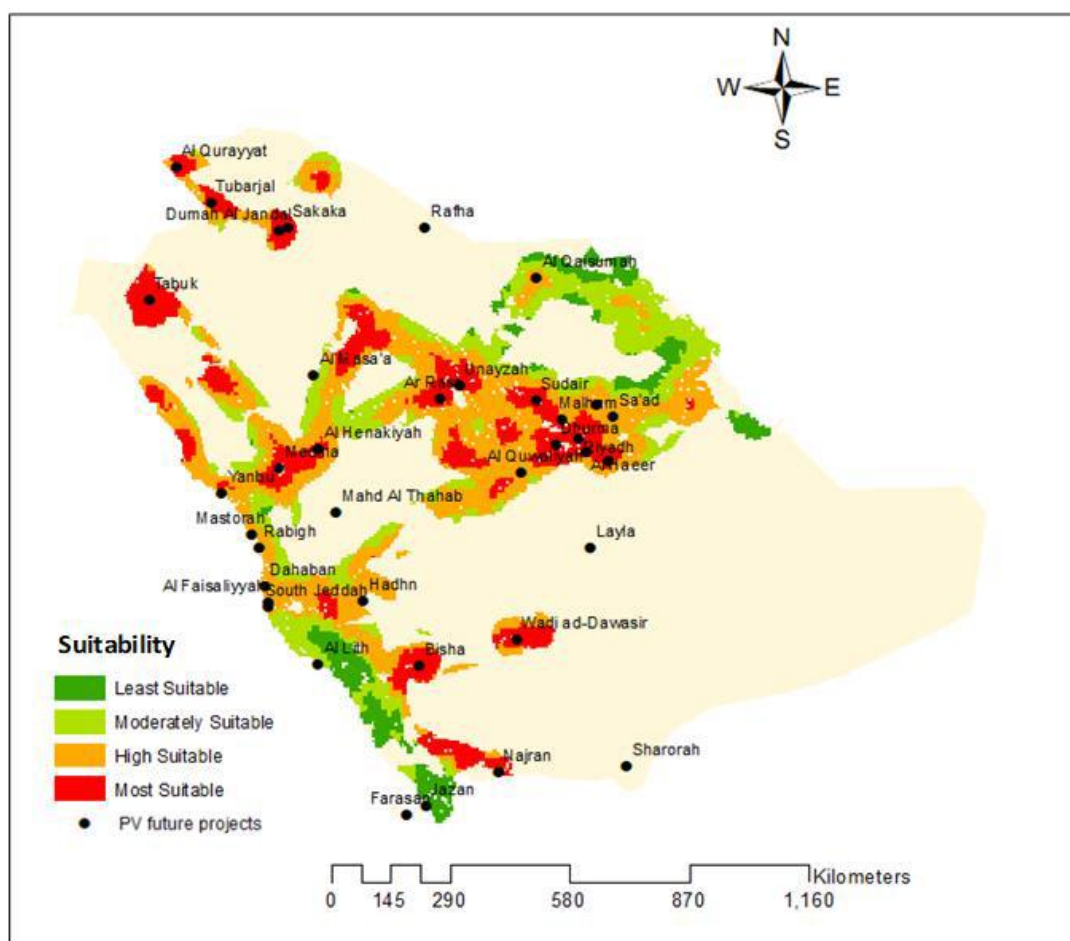
Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας χρησιμοποιήθηκαν τεχνικά και οικονομικά κριτήρια. Στα τεχνικά κριτήρια συμπεριλήφθηκαν η οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiance – GHI), η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, η ατμοσφαιρική πίεση, το albedo της επιφάνειας, η κλίση και ο προσανατολισμός του εδάφους. Η ενσωμάτωση παραμέτρων όπως η σχετική υγρασία, η βροχόπτωση, η ατμοσφαιρική πίεση και το albedo αποτελεί σημαντική καινοτομία της μελέτης, καθώς οι περισσότερες προηγούμενες έρευνες περιορίζονταν κυρίως στην ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία. Στα οικονομικά κριτήρια συμπεριλήφθηκαν οι αποστάσεις από μεγάλες πόλεις, οδικά δίκτυα, γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και δίκτυα μεταφοράς ισχύος, με στόχο τη μείωση του κόστους σύνδεσης και κατασκευής των έργων.

Πριν από την αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε αποκλεισμός περιοχών που θεωρούνται ακατάλληλες για ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Στις περιοχές αυτές περιλαμβάνονται υδάτινα σώματα, προστατευόμενες φυσικές περιοχές, εθνικά πάρκα, περιοχές άγριας ζωής, αστικές περιοχές, οδικοί άξονες και λοιπές χρήσεις γης που δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ένας χάρτης δυνητικά διαθέσιμων εκτάσεων, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Η στάθμιση των κριτηρίων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Fuzzy AHP, ώστε να περιοριστεί η αβεβαιότητα που προκύπτει από τις υποκειμενικές κρίσεις των εμπειρογνομόνων. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος PROMETHEE II, μία μέθοδος υπεροχής (outranking method), η οποία επιτρέπει την πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων βάσει πολλαπλών κριτηρίων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον

υπολογισμό ενός συνολικού δείκτη καταλληλότητας για κάθε χωρική μονάδα της περιοχής μελέτης και την παραγωγή του τελικού χάρτη καταλληλότητας.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η Σαουδική Αραβία διαθέτει ιδιαίτερα υψηλό δυναμικό για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών. Συγκεκριμένα, περίπου 376.623 km², που αντιστοιχούν στο 65,1% της συνολικής εξεταζόμενης έκτασης, ταξινομήθηκαν στις κατηγορίες «υψηλής» και «πολύ υψηλής» καταλληλότητας. Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν συγκρίνοντας τον τελικό χάρτη καταλληλότητας με τις μελλοντικές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που σχεδιάζονται στη χώρα. Η διαδικασία επικύρωσης έδειξε ότι το 90,6% των σχεδιαζόμενων έργων βρίσκεται εντός περιοχών που το μοντέλο χαρακτήρισε ως «πολύ κατάλληλες» ή «υψηλής καταλληλότητας», γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας.



Εικόνα 21. Τελικός χάρτης καταλληλότητας φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στη Σαουδική Αραβία

Η συγκεκριμένη έρευνα αποτελεί ένα από τα πλέον ολοκληρωμένα παραδείγματα εφαρμογής GIS–MCDM στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, καθώς συνδυάζει προηγμένες τεχνικές ασαφούς λογικής, πολυκριτηριακής ανάλυσης και χωρικής αξιολόγησης. Επιπλέον, αναδεικνύει τη σημασία της ενσωμάτωσης περισσότερων κλιματικών παραμέτρων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και αποδεικνύει ότι η χρήση της Fuzzy AHP και της PROMETHEE II μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια και την αξιοπιστία των χαρτών καταλληλότητας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

4.3.5 Μελέτη Περίπτωσης Πακιστάν – GIS και Μηχανική Μάθηση για τη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών

Η μελέτη των Ashraf et al. (2025) παρουσιάζει μία σύγχρονη προσέγγιση χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας στην έρημο Cholistan της επαρχίας Punjab στο Πακιστάν, συνδυάζοντας Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) με τεχνικές Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning). Στόχος της έρευνας ήταν ο εντοπισμός των καταλληλότερων περιοχών για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων, ώστε να αντιμετωπιστεί το σημαντικό ενεργειακό έλλειμμα της περιοχής και να αξιοποιηθεί το υψηλό ηλιακό δυναμικό της ερήμου Cholistan.

Η περιοχή μελέτης καλύπτει περίπου 25.900 km² και χαρακτηρίζεται από έντονα ξηροθερμικές συνθήκες, υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και περιορισμένη νεφοκάλυψη, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για την ανάπτυξη έργων ηλιακής ενέργειας. Η έρημος εκτείνεται στις περιοχές Bahawalpur, Bahawalnagar και Rahim Yar Khan και παρουσιάζει μέση ετήσια θερμοκρασία 28,3°C, με εξαιρετικά υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του έτους.

Σε αντίθεση με τις περισσότερες προηγούμενες μελέτες που βασίζονται αποκλειστικά σε πολυκριτηριακές μεθόδους λήψης αποφάσεων (MCDM), η συγκεκριμένη εργασία αξιοποιεί πραγματικά δεδομένα πεδίου και αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για την παραγωγή χαρτών καταλληλότητας. Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν δεδομένα από 355 σημεία αναφοράς (θέσεις φωτοβολταϊκών και μη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων) και αναπτύχθηκε γεωχωρική βάση δεδομένων με 14 μεταβλητές που αφορούν φυσικογεωγραφικά, κοινωνικοοικονομικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν περιλάμβαναν:

- Χρήσεις γης και κάλυψη γης (Land Use/Land Cover)
- Υψόμετρο
- Κλίση εδάφους
- Προσανατολισμό πρανών (Aspect)
- Θερμοκρασία αέρα
- Ταχύτητα ανέμου
- NDVI
- Συγκέντρωση PM10
- Ηλιακή ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiance – GHI)
- Διάρκεια ηλιοφάνειας
- Πληθυσμιακή πυκνότητα
- Απόσταση από οδικό δίκτυο
- Απόσταση από κατοικημένες περιοχές
- Εκπομπές CO₂.

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS 10.8, ενώ αναπτύχθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα μηχανικής μάθησης:

1. Random Forest (RF)
2. Extreme Gradient Boosting (XGBoost)
3. Multilayer Perceptron Neural Network (MLP)

Η αξιολόγηση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε μέσω των δεικτών AUC (Area Under Curve) και Classification Accuracy (CA). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο Random Forest παρουσίασε την καλύτερη απόδοση, επιτυγχάνοντας $AUC = 0,921$ και ακρίβεια ταξινόμησης 72,3%, υπερέχοντας τόσο του MLP ($AUC = 0,858$) όσο και του XGBoost ($AUC = 0,819$). Ως εκ τούτου, το Random Forest επιλέχθηκε ως το καταλληλότερο μοντέλο για την παραγωγή του τελικού χάρτη καταλληλότητας.

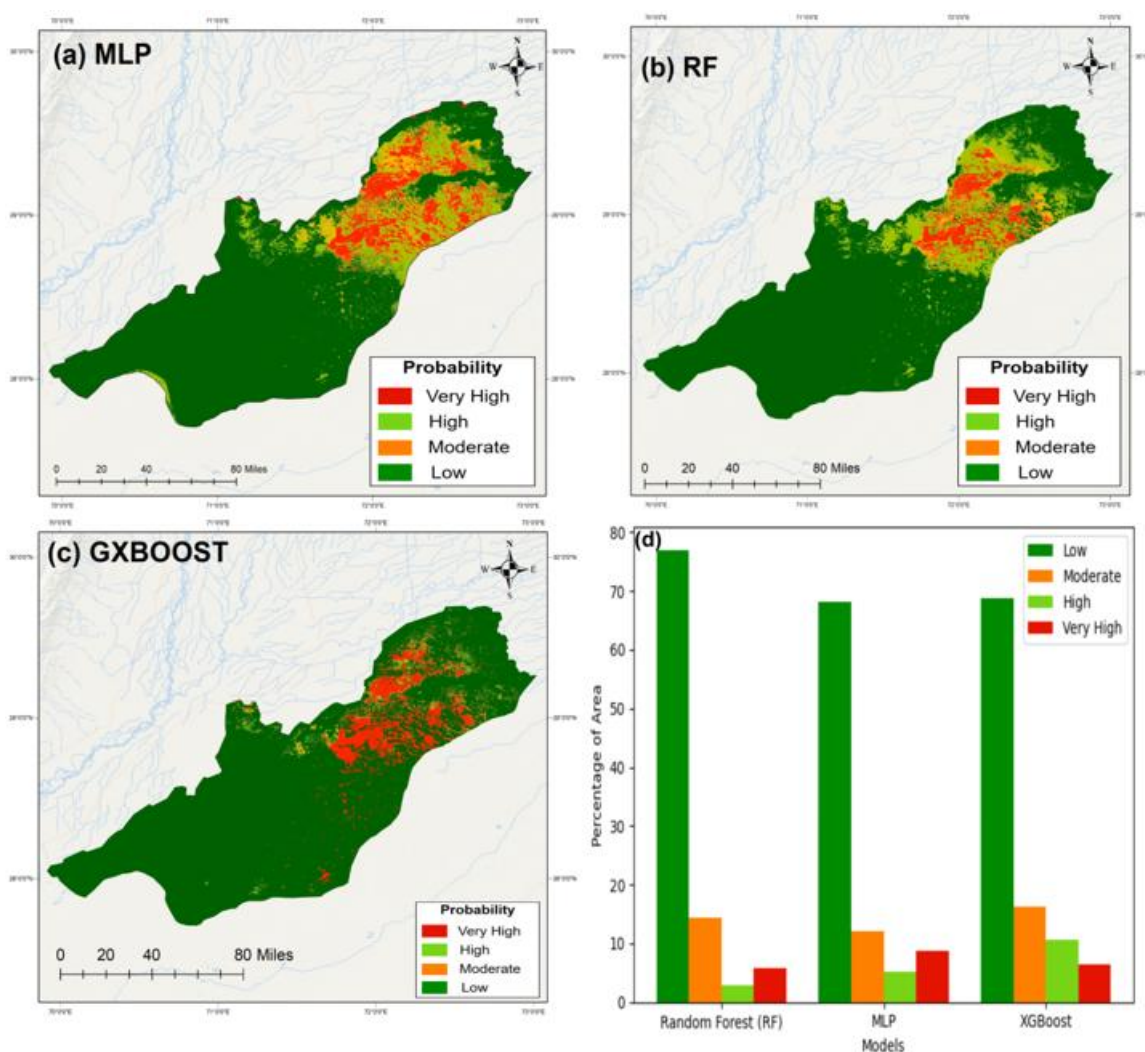
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση σημαντικότητας μεταβλητών (Feature Importance Analysis), η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της μεθόδου SHAP

(SHapley Additive exPlanations). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου Random Forest, οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την καταλληλότητα μιας θέσης για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι:

- Η οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία (GHI)
- Η πληθυσμιακή πυκνότητα
- Ο προσανατολισμός του εδάφους (Aspect)
- Η απόσταση από κατοικημένες περιοχές
- Το υψόμετρο
- Ο δείκτης βλάστησης NDVI
- Η συγκέντρωση PM10
- Η θερμοκρασία
- Η ταχύτητα ανέμου.

Αντίθετα, η διάρκεια ηλιοφάνειας εμφάνισε εξαιρετικά μικρή συνεισφορά σε όλα τα μοντέλα. Οι συγγραφείς αποδίδουν το αποτέλεσμα αυτό στο γεγονός ότι η πληροφορία της ηλιοφάνειας περιλαμβάνεται ήδη έμμεσα στη μεταβλητή GHI, η οποία αποτελεί ακριβέστερο δείκτη του διαθέσιμου ηλιακού ενεργειακού δυναμικού.

Η εφαρμογή του μοντέλου Random Forest οδήγησε στην παραγωγή χωρικών χαρτών πιθανότητας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι περιοχές Bahawalnagar και Bahawalpur παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη καταλληλότητα, με ποσοστά 10,50% και 11,06% αντίστοιχα της συνολικής τους έκτασης να ταξινομούνται στις κατηγορίες «Υψηλή» και «Πολύ Υψηλή» καταλληλότητα. Αντίθετα, η περιοχή Rahim Yar Khan χαρακτηρίστηκε ως λιγότερο κατάλληλη λόγω περιορισμένης προσβασιμότητας και λιγότερο ευνοϊκών τοπογραφικών συνθηκών.



Εικόνα 22. Τελικός χάρτης καταλληλότητας φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων

Η συγκεκριμένη έρευνα αποτελεί ένα από τα πιο πρόσφατα παραδείγματα εφαρμογής τεχνικών GIS και Machine Learning στη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Σε αντίθεση με τις κλασικές προσεγγίσεις GIS–AHP, η μεθοδολογία βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα πεδίου και αξιοποιεί προηγμένους αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης για την πρόβλεψη της καταλληλότητας θέσεων. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στη διαδικασία χωροθέτησης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των προβλέψεων και να υποστηρίξει αποτελεσματικότερα τον ενεργειακό σχεδιασμό μεγάλης κλίμακας.

4.3.6 Μελέτη Περίπτωσης Ιράκ – GIS και AHP για τη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών

Η μελέτη των Nassif, Al-Timimi και Elhmaidi (2025) εξετάζει τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας στο Ιράκ μέσω της συνδυασμένης εφαρμογής Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της μεθόδου Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process – AHP). Στόχος της έρευνας ήταν η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου εθνικού μοντέλου αξιολόγησης καταλληλότητας για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, λαμβάνοντας υπόψη κλιματικούς, περιβαλλοντικούς, τεχνικούς και χωροταξικούς παράγοντες. Η μελέτη διαφοροποιείται από προηγούμενες εφαρμογές, καθώς συνδυάζει την κλασική πολυκριτηριακή ανάλυση με σενάρια κλιματικής αλλαγής έως το έτος 2100.

Το Ιράκ διαθέτει έκταση περίπου 437.049 km² και χαρακτηρίζεται από έντονη γεωμορφολογική διαφοροποίηση, με ορεινές περιοχές στα βόρεια, πεδινές εκτάσεις στο κεντρικό τμήμα και εκτεταμένες ερημικές εκτάσεις στα νότια. Παράλληλα, η χώρα εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, γεγονός που την καθιστά μία από τις πλέον υποσχόμενες περιοχές της Μέσης Ανατολής για την ανάπτυξη έργων ηλιακής ενέργειας.

Η μεθοδολογία βασίσθηκε σε ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο GIS–MCDM, στο οποίο ενσωματώθηκαν γεωχωρικά δεδομένα από διεθνείς και εθνικές βάσεις δεδομένων. Τα δεδομένα προήλθαν κυρίως από τη NASA, το USGS και το Υπουργείο Υδάτινων Πόρων του Ιράκ και επεξεργάστηκαν στο περιβάλλον ArcGIS 10.8.

Τα βασικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της καταλληλότητας ήταν:

- Ηλιακή ακτινοβολία (Global Horizontal Irradiance – GHI)
- Κλίση εδάφους
- Χρήσεις και κάλυψη γης (Land Use/Land Cover)
- Απόσταση από πόλεις
- Απόσταση από οδικό δίκτυο
- Απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Θερμοκρασία αέρα
- Ύψομετρικά χαρακτηριστικά

- Προστατευόμενες περιοχές και υδάτινα σώματα.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε προεπεξεργασία των γεωχωρικών δεδομένων, με επαναταξινόμηση (reclassification) όλων των θεματικών επιπέδων σε κοινή κλίμακα καταλληλότητας. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος AHP για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη (pairwise comparisons), σύμφωνα με την εννεαβάθμια κλίμακα του Saaty. Η αξιοπιστία των συγκρίσεων αξιολογήθηκε με τον δείκτη συνέπειας (Consistency Ratio – CR), ο οποίος υπολογίστηκε ίσος με 4,01%, τιμή σημαντικά μικρότερη από το αποδεκτό όριο του 10%, γεγονός που υποδηλώνει υψηλή αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Τα τελικά βάρη των κριτηρίων έδειξαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα επιλογής θέσεων, λαμβάνοντας βάρος 39,8%. Ακολουθούν η κλίση του εδάφους με 18,9%, οι χρήσεις γης με 9,8%, η απόσταση από γραμμές μεταφοράς με 10%, η απόσταση από το οδικό δίκτυο με 10% και η απόσταση από αστικά κέντρα με 8,9%. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι η ενεργειακή απόδοση και η δυνατότητα σύνδεσης με τις υφιστάμενες υποδομές αποτελούν τους βασικούς παράγοντες χωροθέτησης φωτοβολταϊκών έργων στο Ιράκ.

Η ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας έδειξε ότι οι υψηλότερες τιμές GHI (5,4–5,6 kWh/m²/ημέρα) εντοπίζονται στα νότια και νοτιοανατολικά τμήματα της χώρας, ιδιαίτερα στις επαρχίες Basra, Maysan, Muthanna και Dhi Qar. Αντίθετα, οι βόρειες ορεινές περιοχές εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές εξαιτίας του μεγαλύτερου υψομέτρου και της αυξημένης νεφοκάλυψης. Ως εκ τούτου, οι νότιες περιοχές αξιολογήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

Η τοπογραφική ανάλυση έδειξε ότι το μεγαλύτερο μέρος της Μεσοποταμιακής πεδιάδας παρουσιάζει κλίσεις μικρότερες του 3%, χαρακτηριστικό που ευνοεί ιδιαίτερα την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων λόγω μειωμένων χωματουργικών εργασιών και χαμηλότερου κατασκευαστικού κόστους. Αντίθετα, οι ορεινές περιοχές του βόρειου Ιράκ με κλίσεις άνω του 10% κρίθηκαν ακατάλληλες για εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

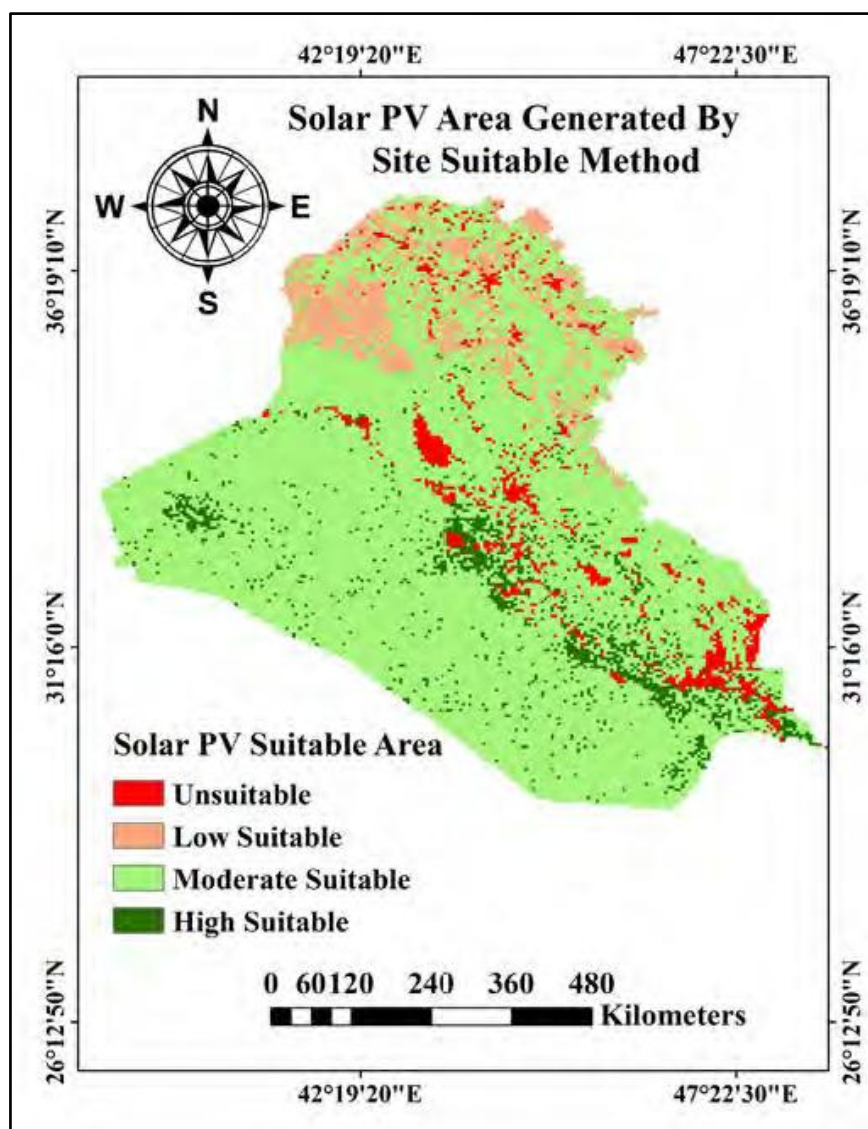
Παράλληλα, η ανάλυση των υποδομών έδειξε ότι οι κεντρικές και νοτιοανατολικές περιοχές της χώρας διαθέτουν μεγαλύτερη πυκνότητα δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οδικών αξόνων. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν μικρότερες αποστάσεις σύνδεσης με το

ηλεκτρικό δίκτυο και χαμηλότερο κόστος μεταφοράς εξοπλισμού, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τη συνολική καταλληλότητά τους για επενδύσεις φωτοβολταϊκών πάρκων.

Το τελικό μοντέλο GIS–AHP παρήγαγε χάρτη καταλληλότητας τεσσάρων κατηγοριών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι περιοχές υψηλής καταλληλότητας καλύπτουν 27.614 km², ποσοστό 6,3% της συνολικής έκτασης του Ιράκ. Οι περιοχές μέτριας καταλληλότητας καλύπτουν 349.985 km² (79,8%), οι περιοχές χαμηλής καταλληλότητας 37.257 km² (8,5%), ενώ οι ακατάλληλες περιοχές περιορίζονται σε 23.458 km² (5,4%). Οι πλέον κατάλληλες ζώνες εντοπίζονται κυρίως στις επαρχίες Basra, Maysan, Najaf, Al-Muthanna και Dhi Qar.

Επιπλέον, οι συγγραφείς προχώρησαν σε εκτίμηση του τεχνικού ενεργειακού δυναμικού των κατάλληλων περιοχών. Υπολογίσθηκε ότι οι διαθέσιμες εκτάσεις υψηλής καταλληλότητας μπορούν να υποστηρίξουν εγκατεστημένη ισχύ έως 8.700 MW και να παράγουν περίπου 13,54 TWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως εφόσον αξιοποιηθεί το 20% των διαθέσιμων εκτάσεων. Ακόμη και με αξιοποίηση μόλις του 5% των κατάλληλων περιοχών, η ετήσια παραγωγή εκτιμάται σε 3,39 TWh.

Ιδιαίτερο στοιχείο της μελέτης αποτελεί η ενσωμάτωση σεναρίων κλιματικής αλλαγής (CMIP6 SSP1–SSP5) μέχρι το 2100. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέση θερμοκρασία στο Ιράκ αναμένεται να αυξηθεί στους 34–35°C έως το τέλος του αιώνα, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι συγγραφείς επισημαίνουν την ανάγκη χρήσης προηγμένων τεχνολογιών ψύξης και υλικών υψηλής θερμικής αντοχής για τη διατήρηση της ενεργειακής απόδοσης των μελλοντικών εγκαταστάσεων.



Εικόνα 23. Τελικός χάρτης καταλληλότητας φωτοβολταϊκών σταθμών στο Ιράκ

Η μελέτη αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας GIS–AHP σε εθνική κλίμακα και αναδεικνύει τη σημασία της συνδυασμένης αξιολόγησης φυσικών, τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων στη διαδικασία χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών. Παράλληλα, η ενσωμάτωση μελλοντικών κλιματικών σεναρίων προσφέρει ένα πρόσθετο επίπεδο ανάλυσης που συμβάλλει στον μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό και στην ανθεκτικότητα των έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

4.3.7 Μελέτη Περίπτωσης Νιγηρίας – GIS και AHP για τη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών στην Ikorodu

Η μελέτη των Onuoha et al. (2025) εξετάζει τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών μεγάλης κλίμακας στην περιοχή Ikorodu της πολιτείας Lagos στη Νιγηρία, μέσω της συνδυασμένης εφαρμογής Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της μεθόδου Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process – AHP). Στόχος της έρευνας ήταν η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου πολυκριτηριακής αξιολόγησης για τον εντοπισμό των καταλληλότερων περιοχών εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάρκων, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικούς, τεχνικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Η μελέτη αναπτύχθηκε σε αστικό και περιαστικό περιβάλλον, όπου η πυκνότητα πληθυσμού, οι χρήσεις γης και οι υποδομές δημιουργούν πρόσθετες προκλήσεις στη διαδικασία χωροθέτησης.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη νοτιοδυτική Νιγηρία και καλύπτει έκταση περίπου 345 km². Η Ikorodu αποτελεί μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες περιοχές της μητροπολιτικής περιοχής του Lagos, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα σημαντική την ορθολογική επιλογή θέσεων για μελλοντικές ενεργειακές υποδομές. Παράλληλα, η Νιγηρία εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα ενεργειακής επάρκειας, καθώς μόλις το 59,5% του πληθυσμού είχε πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια το 2021, ενώ το ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας παραμένει χαμηλό.

Η μεθοδολογία της έρευνας βασίσθηκε σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο GIS–AHP. Αρχικά προσδιορίστηκαν οι περιορισμοί (constraints) και τα κριτήρια αξιολόγησης (decision criteria), ενώ στη συνέχεια αναπτύχθηκαν τα αντίστοιχα θεματικά επίπεδα πληροφορίας (thematic layers) στο περιβάλλον ArcGIS 10.9.1. Ακολούθησε η εφαρμογή της μεθόδου AHP για την εκτίμηση των σχετικών βαρών των κριτηρίων μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη (pairwise comparisons) και τελικά πραγματοποιήθηκε σύνθεση όλων των θεματικών επιπέδων μέσω της μεθόδου Weighted Overlay για την παραγωγή του τελικού χάρτη καταλληλότητας.

Τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Ηλιακή ακτινοβολία (Solar Irradiation)
- Μέση θερμοκρασία αέρα (Average Air Temperature)

- Κλίση εδάφους (Slope)
- Προσανατολισμός εδάφους (Aspect)
- Απόσταση από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Απόσταση από κύριους οδικούς άξονες
- Απόσταση από αστικές περιοχές
- Υψόμετρο.

Παράλληλα, εφαρμόστηκαν συγκεκριμένοι χωρικοί περιορισμοί ώστε να αποκλειστούν περιοχές ακατάλληλες για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων. Οι περιορισμοί περιλάμβαναν εκτάσεις με κλίση μεγαλύτερη από 5°, βόρειους προσανατολισμούς, υδάτινα σώματα, περιοχές πυκνής βλάστησης και ζώνες σε απόσταση μικρότερη των 100 μέτρων από κύριους οδικούς άξονες. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, οι περιοχές αυτές είτε παρουσιάζουν τεχνικές δυσκολίες εγκατάστασης είτε δημιουργούν περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις που καθιστούν μη βιώσιμη την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Η διαδικασία στάθμισης μέσω AHP έδειξε ότι η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο χωροθέτησης με βάρος 32,7%. Ακολουθούν η μέση θερμοκρασία αέρα με 22,7%, η κλίση του εδάφους με 15,7% και ο προσανατολισμός με 10,7%. Μικρότερη βαρύτητα αποδόθηκε στην απόσταση από γραμμές μεταφοράς (7,3%), στην απόσταση από το οδικό δίκτυο (5,0%), στην απόσταση από αστικές περιοχές (3,4%) και στο υψόμετρο (2,5%). Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι οι κλιματικοί και γεωμορφολογικοί παράγοντες επηρεάζουν περισσότερο την επιλογή θέσεων σε σχέση με τα κοινωνικοοικονομικά κριτήρια.

Η αξιοπιστία της διαδικασίας AHP ελέγχθηκε μέσω του Δείκτη Συνέπειας (Consistency Ratio – CR). Η τιμή που προέκυψε ήταν $CR = 0,03$, σημαντικά μικρότερη από το αποδεκτό όριο του 0,10, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι συγκρίσεις ανά ζεύγη ήταν συνεπείς και τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

Η ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας έδειξε ότι οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ περίπου 753.000 και 768.000 Wh/m², με τις υψηλότερες τιμές να εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν αυξημένο

δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς αξιολογήθηκαν ως περισσότερο κατάλληλες για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Αντίστοιχα, η τοπογραφική ανάλυση έδειξε ότι το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής χαρακτηρίζεται από χαμηλές κλίσεις, γεγονός που ευνοεί την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων καθώς μειώνει τις απαιτούμενες χωματουργικές εργασίες και το κόστος κατασκευής. Οι περιοχές με κλίσεις άνω των 5° αποκλείστηκαν από την ανάλυση, καθώς θεωρήθηκαν τεχνικά και οικονομικά λιγότερο αποδοτικές.

Η ανάλυση των υποδομών κατέδειξε ότι η εγγύτητα σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οδικούς άξονες αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για τη μείωση του κόστους σύνδεσης και συντήρησης των εγκαταστάσεων. Παράλληλα, η εγγύτητα σε αστικά κέντρα συμβάλλει στη μείωση των απωλειών μεταφοράς και του κόστους ανάπτυξης δικτύων διανομής. Ωστόσο, οι συγγραφείς τονίζουν ότι η υπερβολική εγγύτητα σε κύριους οδικούς άξονες μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα ασφάλειας, οπτικής όχλησης και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Το τελικό μοντέλο καταλληλότητας παρήγαγε πέντε κατηγορίες χωρικής καταλληλότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το 68,77% της έκτασης της Ikorodu χαρακτηρίστηκε ως ακατάλληλο για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων. Το 17,78% ταξινομήθηκε ως υψηλής καταλληλότητας, το 12,67% ως μέτριας καταλληλότητας, το 0,73% ως οριακά κατάλληλο, ενώ μόλις το 0,04% της συνολικής έκτασης χαρακτηρίστηκε ως απολύτως βέλτιστο για ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Τα αποτελέσματα αυτά υπογραμμίζουν τους σημαντικούς χωρικούς περιορισμούς που προκύπτουν σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές και αναδεικνύουν την ανάγκη προσεκτικού χωροταξικού σχεδιασμού.

Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι η συνδυασμένη εφαρμογή GIS και AHP αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο λήψης αποφάσεων για τον ενεργειακό σχεδιασμό, επιτρέποντας την ταυτόχρονη αξιολόγηση περιβαλλοντικών, τεχνικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στη Νιγηρία αλλά και σε άλλες αναπτυσσόμενες χώρες που επιδιώκουν τη μετάβαση σε βιώσιμα ενεργειακά συστήματα και την αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

4.3.8 Μελέτη Περίπτωσης Τουρκίας – Ολοκληρωμένο Μοντέλο Fuzzy AHP–GIS–FIA για τη Χωροθέτηση Φωτοβολταϊκών Σταθμών

Η μελέτη των Yildiz, Cebi και Yildiz (2025) προτείνει ένα ολοκληρωμένο πολυκριτηριακό μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων για τη χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών (Solar Power Plants – SPPs) στην Τουρκία, συνδυάζοντας τη Θεωρία Ασαφών Συνόλων (Fuzzy Sets), τη μέθοδο Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και τη μέθοδο του Αξιώματος Πληροφορίας (Fuzzy Information Axiom – FIA). Στόχος της έρευνας ήταν η επιλογή της καταλληλότερης περιοχής εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού μεταξύ έξι εναλλακτικών επαρχιών της Τουρκίας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά κριτήρια. Η μελέτη επιχειρεί να καλύψει ένα σημαντικό κενό της διεθνούς βιβλιογραφίας, καθώς τα περισσότερα υφιστάμενα μοντέλα αξιολογούν είτε ποσοτικά είτε ποιοτικά κριτήρια, χωρίς να τα ενσωματώνουν ταυτόχρονα σε ένα ενιαίο πλαίσιο λήψης αποφάσεων.

Η ανάγκη για ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην Τουρκία συνδέεται άμεσα με την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση και την εξάρτηση της χώρας από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η Τουρκία διαθέτει σημαντικό ηλιακό δυναμικό λόγω της γεωγραφικής της θέσης, γεγονός που καθιστά την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στρατηγική επιλογή για τη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία οργανώνεται σε τρεις κύριες φάσεις. Η πρώτη φάση αφορά τον καθορισμό του προβλήματος και των κριτηρίων αξιολόγησης. Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει τον εντοπισμό των πιθανών εναλλακτικών περιοχών μέσω GIS, ενώ η τρίτη φάση αφορά την τελική αξιολόγηση και κατάταξη των υποψηφίων περιοχών μέσω της μεθόδου FIA. Το μεθοδολογικό διάγραμμα της έρευνας παρουσιάζει μια σαφή ροή εργασίας από τη συλλογή δεδομένων έως την τελική επιλογή της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης.

Οι εναλλακτικές περιοχές που εξετάστηκαν ήταν οι επαρχίες Erzurum, Kayseri, Mersin, Muğla, Şanlıurfa και Van, οι οποίες βρίσκονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιφέρειες της Τουρκίας και παρουσιάζουν διαφορετικά κλιματικά, οικονομικά και χωρικά χαρακτηριστικά. Η επιλογή τους επέτρεψε τη δοκιμή της αποτελεσματικότητας του μοντέλου σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών και αναπτυξιακών συνθηκών.

Για την αξιολόγηση των υποψήφιων περιοχών χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις βασικές κατηγορίες κριτηρίων:

1. Ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία
2. Κλιματολογικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά
3. Καταλληλότητα γης για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών
4. Οικονομικά κριτήρια.

Τα παραπάνω κριτήρια αναλύθηκαν περαιτέρω σε δέκα υποκριτήρια. Στην πρώτη ομάδα περιλαμβάνονταν η μέση ετήσια διάρκεια ηλιοφάνειας, η μέση θερμοκρασία αέρα και η ηλιακή ακτινοβολία. Στη δεύτερη ομάδα εξετάστηκαν η σχετική υγρασία, οι χιονοπτώσεις και το συνολικό ύψος βροχόπτωσης. Η τρίτη ομάδα αφορούσε την έκταση των κατάλληλων περιοχών που προέκυπταν από την ανάλυση GIS, ενώ η τέταρτη ομάδα περιλάμβανε τον βαθμό ανάπτυξης της περιοχής, το κόστος χρήσης του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και το ενεργειακό έλλειμμα κάθε επαρχίας.

Για τον προσδιορισμό της σχετικής βαρύτητας των κριτηρίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Fuzzy AHP. Στη διαδικασία συμμετείχαν επτά ειδικοί του ενεργειακού τομέα, οι οποίοι πραγματοποίησαν συγκρίσεις ανά ζεύγη χρησιμοποιώντας γλωσσικές μεταβλητές όπως «ισοδύναμη σημασία», «ασθενώς σημαντικό», «ουσιαστικά σημαντικό», «πολύ σημαντικό» και «απολύτως σημαντικό». Οι λεκτικές αξιολογήσεις μετατράπηκαν σε τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς και στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα τελικά βάρη των κριτηρίων. Η συνέπεια των συγκρίσεων ελέγχθηκε μέσω του Δείκτη Συνέπειας (Consistency Ratio – CR), ο οποίος βρέθηκε μικρότερος από το αποδεκτό όριο 0,10, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Η χωρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού ArcMap 10.2. Αρχικά συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν όλα τα απαιτούμενα γεωχωρικά δεδομένα, ενώ στη συνέχεια εφαρμόστηκαν διαδικασίες αναταξινόμησης (reclassification), δημιουργίας ζωνών επιρροής (buffering), εξαγωγής και συγχώνευσης χωρικών επιπέδων. Μέσω αυτής της διαδικασίας προσδιορίστηκαν οι κατάλληλες εκτάσεις για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών σε κάθε μία από τις έξι επαρχίες. Οι χάρτες καταλληλότητας που προέκυψαν αποτέλεσαν μία από τις βασικές εισόδους του τελικού μοντέλου αξιολόγησης.

Σε αντίθεση με πολλές προηγούμενες μελέτες που χρησιμοποιούν μόνο GIS–AHP, οι συγγραφείς ενσωμάτωσαν και τη μέθοδο Fuzzy Information Axiom (FIA) για την τελική κατάταξη των εναλλακτικών. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη αξιολόγηση ποσοτικών και ποιοτικών μεταβλητών υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Για κάθε κριτήριο υπολογίστηκε το πληροφοριακό περιεχόμενο (information content), ενώ η συνολική αξιολόγηση κάθε εναλλακτικής προέκυψε από το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους πληροφοριακών περιεχομένων. Σύμφωνα με τη θεωρία του Αξιώματος Πληροφορίας, η βέλτιστη εναλλακτική είναι εκείνη που παρουσιάζει το μικρότερο συνολικό πληροφοριακό περιεχόμενο.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής έδειξαν ότι η επαρχία Mersin αποτελεί την πλέον κατάλληλη περιοχή για εγκατάσταση φωτοβολταϊκού σταθμού μεταξύ των έξι εξεταζόμενων εναλλακτικών. Η περιοχή συγκέντρωσε τις υψηλότερες επιδόσεις σε κρίσιμους δείκτες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η διάρκεια ηλιοφάνειας, οι κλιματικές συνθήκες και η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Αντίθετα, άλλες περιοχές παρουσίασαν μειονεκτήματα που σχετίζονταν είτε με δυσμενέστερες κλιματικές συνθήκες είτε με περιορισμούς στη διαθεσιμότητα κατάλληλης γης.

Προκειμένου να ελεγχθεί η σταθερότητα των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Η διαδικασία αυτή εξέτασε την επίδραση πιθανών μεταβολών στα βάρη των κριτηρίων στην τελική κατάταξη των εναλλακτικών περιοχών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η Mersin διατηρούσε την πρώτη θέση ακόμη και όταν μεταβάλλονταν σημαντικά οι βαρύτητες των βασικών κριτηρίων, γεγονός που υποδηλώνει υψηλή αξιοπιστία και ανθεκτικότητα του προτεινόμενου μοντέλου λήψης αποφάσεων.

Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι η συνδυασμένη χρήση Fuzzy AHP, GIS και FIA αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη χωροθέτηση έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς επιτρέπει την ολοκληρωμένη αξιολόγηση τεχνικών, περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων. Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε έργα φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων όσο και σε άλλες ενεργειακές υποδομές, προσφέροντας ένα ευέλικτο πλαίσιο υποστήριξης στρατηγικών αποφάσεων στον τομέα της βιώσιμης ανάπτυξης.

5. Συμπεράσματα

Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα του ενεργειακού σχεδιασμού, καθώς η συνεχής αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δημιουργεί την ανάγκη για ορθολογική αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου και ταυτόχρονα για ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων. Η παρούσα εργασία επιχείρησε να διερευνήσει τις σύγχρονες προσεγγίσεις χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών μέσω της συνδυασμένης χρήσης Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και μεθόδων Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Λήψης Αποφάσεων (MCDM), εστιάζοντας τόσο στα κριτήρια αξιολόγησης όσο και στις μεθοδολογίες στάθμισης και σύνθεσης δεικτών καταλληλότητας.

Η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας κατέδειξε ότι η επιλογή κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως το ηλιακό δυναμικό μιας περιοχής. Αντίθετα, η αποτελεσματική χωροθέτηση προϋποθέτει την ταυτόχρονη συνεκτίμηση τεχνικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων. Οι μελέτες των Charabi και Gastli (2011), Sánchez-Lozano et al. (2013), Tahri et al. (2015), Noorollahi et al. (2016), Zambrano-Asanza et al. (2021) και Almasad et al. (2023) συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα καταλληλότητας, καθώς επηρεάζει άμεσα την αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή και συνεπώς τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Ωστόσο, η υψηλή ηλιακή ακτινοβολία από μόνη της δεν αρκεί για να καταστήσει μια περιοχή κατάλληλη για ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Ιδιαίτερα σημαντικός αναδείχθηκε ο ρόλος των τοπογραφικών χαρακτηριστικών, κυρίως της κλίσης και του προσανατολισμού του εδάφους. Οι περισσότερες εφαρμογές GIS–MCDM έδειξαν ότι περιοχές με χαμηλές κλίσεις παρουσιάζουν σαφές πλεονέκτημα τόσο ως προς την ενεργειακή απόδοση όσο και ως προς το κόστος κατασκευής και συντήρησης των εγκαταστάσεων. Παράλληλα, η εγγύτητα στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους οικονομικούς παράγοντες, καθώς η απόσταση από υφιστάμενες υποδομές επηρεάζει σημαντικά το συνολικό κόστος υλοποίησης των έργων (Tahri et al., 2015· Zambrano-Asanza et al., 2021).

Εξίσου σημαντικός αποδείχθηκε ο ρόλος των περιβαλλοντικών περιορισμών. Οι περισσότερες μελέτες που εξετάστηκαν αποκλείουν εξ αρχής περιοχές υψηλής οικολογικής

αξίας, προστατευόμενες περιοχές και οικοσυστήματα που εντάσσονται σε καθεστώα προστασίας, όπως το δίκτυο Natura 2000 στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η πρακτική αυτή επιβεβαιώνει ότι η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνικό ή οικονομικό πρόβλημα, αλλά συνδέεται άμεσα με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος (Vagiona, 2021· Bertsiou et al., 2025· Yildiz et al., 2025).

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας αφορά τις μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία χωροθέτησης. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση κατέδειξε ότι η μέθοδος AHP εξακολουθεί να αποτελεί την κυρίαρχη προσέγγιση διεθνώς λόγω της απλότητας εφαρμογής της, της δυνατότητας ιεραρχικής οργάνωσης των κριτηρίων και του ελέγχου συνέπειας που παρέχει κατά τη διαδικασία στάθμισης. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, αρκετοί ερευνητές επισημαίνουν ότι η κλασική AHP αδυνατεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά την αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις κρίσεις των ειδικών, ιδιαίτερα όταν οι αξιολογήσεις βασίζονται σε υποκειμενικές εκτιμήσεις (Buckley, 1985· Chang, 1996).

Για τον λόγο αυτό παρατηρείται τα τελευταία χρόνια σημαντική αύξηση των εφαρμογών της Fuzzy AHP. Η ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής επιτρέπει την καλύτερη αναπαράσταση της αβεβαιότητας και της ασάφειας που χαρακτηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, οδηγώντας σε αποτελέσματα που θεωρούνται περισσότερο ρεαλιστικά και προσαρμοσμένα στις πραγματικές συνθήκες. Οι εφαρμογές των Almasad et al. (2023), Prieto-Amparán et al. (2021), Zandi και Lotfata (2025) και Yildiz et al. (2025) υποδεικνύουν ότι οι ασαφείς προσεγγίσεις παρουσιάζουν αυξημένη αξιοπιστία, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με περιβάλλον GIS και μεθόδους κατάταξης εναλλακτικών λύσεων όπως οι TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE.

Η έρευνα ανέδειξε επίσης ότι δεν υπάρχει μία μοναδική μέθοδος που να μπορεί να χαρακτηριστεί ως η βέλτιστη για κάθε πρόβλημα χωροθέτησης. Αντίθετα, η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου εξαρτάται από τη φύση των διαθέσιμων δεδομένων, τον αριθμό των κριτηρίων, το επίπεδο αβεβαιότητας και τους στόχους της ανάλυσης. Παρόλα αυτά, η συνδυαστική αξιοποίηση GIS και Fuzzy MCDM προσεγγίσεων φαίνεται να αποτελεί τη σημαντικότερη τάση της σύγχρονης βιβλιογραφίας, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη

διαχείριση χωρικών δεδομένων και αβεβαιότητας στη λήψη αποφάσεων (Almasad, 2022· Almasad et al., 2023· Yildiz et al., 2025).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και το ζήτημα της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων ως προς τα βάρη των κριτηρίων. Η ανάλυση των σχετικών μελετών έδειξε ότι ακόμη και μικρές μεταβολές στα βάρη είναι δυνατόν να επηρεάσουν σημαντικά την τελική κατάταξη των περιοχών καταλληλότητας. Οι Prieto-Amparán et al. (2021) διαπίστωσαν ότι διαφορετικές προσεγγίσεις στάθμισης οδηγούν σε διαφορετική έκταση περιοχών υψηλής καταλληλότητας, ενώ οι Yildiz et al. (2025) απέδειξαν ότι η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχα, οι Zandi και Lotfata (2025) επισημαίνουν ότι διαφορετικές μέθοδοι MCDM μπορεί να παράγουν διαφορετικές ιεραρχήσεις των ίδιων εναλλακτικών θέσεων, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συστηματική διερεύνηση της σταθερότητας των αποτελεσμάτων.

Συνολικά, η παρούσα εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών αποτελεί πολυπαραγοντικό πρόβλημα χωρικής λήψης αποφάσεων, στο οποίο η χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών σε συνδυασμό με σύγχρονες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης προσφέρει ένα ολοκληρωμένο και επιστημονικά τεκμηριωμένο πλαίσιο αξιολόγησης. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η αξιοποίηση υβριδικών προσεγγίσεων GIS–Fuzzy MCDM οδηγεί σε περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη ενσωμάτωση τεχνικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων. Ως εκ τούτου, οι προσεγγίσεις αυτές αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στον μελλοντικό ενεργειακό σχεδιασμό και στην επίτευξη των στόχων της ενεργειακής μετάβασης σε εθνικό και διεθνές επίπεδο.

Βιβλιογραφία

- Abu Taha, R., & Daim, T. (2013). Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review. *Research and Technology Management in the Electricity Industry*, 60, 17–30. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5097-8_2
- Adem Esmail, B., & Geneletti, D. (2018). Multi-criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(1), 42–53. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12899>
- Akusta, E., & Cergibozan, R. (2024). Assessment and prioritization of renewable energy alternatives to achieve sustainable development goals in Türkiye: Based on fuzzy AHP approach. *International Journal of Energy Studies*, 9(4), 809–847. <https://doi.org/10.58559/ijes.1494256>
- Al-Ali, S., Olabi, A. G., & Mahmoud, M. (2024). Multi-Criteria Decision Making for Selecting the Location of a Solar Photovoltaic Park: A Case Study in UAE. *Energies*, 17(17), 4235–4235. <https://doi.org/10.3390/en17174235>
- Al-Aziz, M. A.-., Mahmud, S. ., Islam, M. A. ., Al Mahmud, J. ., & Md. Hasib, K. . (2020). A Comparative Study of AHP and Fuzzy AHP Method for Inconsistent Data. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 54(4), 16–37. <https://www.gssrr.org/JournalOfBasicAndApplied/article/view/11939>
- Algazel, E., & Badi, I. (2026). A Systematic Review of integrated GIS and MCDM methodology for Wind Farm Site Selection: Trends, Methods, and Criteria. *Spectrum of Operational Research*, 1–19. <https://doi.org/10.31181/sor41202761>
- Almasad, A., Pavlak, G., Alquthami, T., & Kumara, S. (2023). Site suitability analysis for implementing solar PV power plants using GIS and fuzzy MCDM based approach. *Solar Energy*, 249, 642–650. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.046>
- Asakereh, A., Omid, M., Alimardani, R., & Sarmadian, F. (2014). Developing a GIS-based Fuzzy AHP Model for Selecting Solar Energy Sites in Shodirwan Region in Iran. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 68, 37–48. <https://doi.org/10.14257/ijast.2014.68.04>

- Ashraf, H. A., Li, J., Li, Z., Sohail, A., Ahmed, R., Butt, M. H., & Ullah, H. (2025). Geographic Information System and Machine Learning Approach for Solar Photovoltaic Site Selection: A Case Study in Pakistan. *Processes*, 13(4), 981. <https://doi.org/10.3390/pr13040981>
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- 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), 125–125. <https://doi.org/10.3390/ijgi14030125>
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233–247. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9)
- Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Charabi, Y., & Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554–2561. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.037>
- de Luis-Ruiz, J. M., Salas-Menocal, B. R., Pereda-García, R., Pérez-Álvarez, R., Sedano-Cibrián, J., & Ruiz-Fernández, C. (2024). Optimal Location of Solar Photovoltaic Plants Using Geographic Information Systems and Multi-Criteria Analysis. *Sustainability*, 16(7), 2895. <https://doi.org/10.3390/su16072895>
- Deveci, M., Cali, U., & Pamucar, D. (2021). Evaluation of criteria for site selection of solar photovoltaic (PV) projects using fuzzy logarithmic additive estimation of weight coefficients. *Energy Reports*, 7, 8805–8824. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.10.104>
- Eldamaty, T., Ahmed, A. G., & Helal, M. M. (2023). GIS-Based Multi Criteria Analysis for Solar Power Plant Site Selection Support in Mecca. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(3), 10963–10968. <https://doi.org/10.48084/etasr.5927>
- Estévez, R. A., Espinoza, V., Ponce Oliva, R. D., Vásquez-Lavín, F., & Gelcich, S. (2021). Multi-Criteria Decision Analysis for Renewable Energies: Research Trends, Gaps and the

Challenge of Improving Participation. *Sustainability*, 13(6), 3515.
<https://doi.org/10.3390/su13063515>

European Commission. (2022). *EU Solar Energy Strategy*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221>

Faraslis, I., Margaritopoulou, V., Christakis, C., & Providas, E. (2025). Evaluating Landscape Fragmentation and Consequent Environmental Impact of Solar Parks Installation in Natura 2000 Protected Areas: The Case of the Thessaly Region, Central Greece. *Sustainability*, 17(15), 7158. <https://doi.org/10.3390/su17157158>

Farsi, H., Dizene, R., Flamant, G., & Notton, G. (2024). Multi-Criteria Decision Making Methods for Suitable Site Selection of Concentrating Solar Power Plants. *Sustainability*, 16(17), 7673–7673. <https://doi.org/10.3390/su16177673>

Feng, Z., Chen, J., Lv, D., Wang, P., Zheng, K., Guo, Z., & Yue, X. (2025). Research on Offshore Photovoltaic Project Site Selection Based on PRISMA: A Systematic Review. *Sustainability*, 17(18), 8293–8293. <https://doi.org/10.3390/su17188293>

Gazi, K. H., Mukherjee, A. K., Mukherjee, S. B., Mondal, S. P., Salahshour, S., & Ghosh, A. (2026). Site Selection for Solar Photovoltaic Power Plant Using MCDM Method with New De-i-Fuzzification Technique. *Analytics*, 5(1), 10. <https://doi.org/10.3390/analytics5010010>

Ghasempour, R., Nazari, M.A., Ebrahimi, M., Ahmadi, M.H. & Hadiyanto, H. (2019) Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approach for Selecting Solar Plants Site and Technology: A Review. *Int. Journal of Renewable Energy Development*, 8(1), 15-25, doi.org/10.14710/ijred.8.1.15-25

Greene, R., Devillers, R., Luther, J. E., & Eddy, B. G. (2011). GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass*, 5(6), 412–432. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x>

Guaita-Pradas, I., Marques-Perez, I., Gallego, A., & Segura, B. (2019). Analyzing territory for the sustainable development of solar photovoltaic power using GIS databases. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7871-8>

- Heo, E., Kim, J., & Boo, K.-J. (2010). Analysis of the assessment factors for renewable energy dissemination program evaluation using fuzzy AHP. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2214–2220. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.020>
- Hübl, F., Welscher, F., & Scholz, J. (2024). Multi-Criteria Decision Analysis to Evaluate the Geographic Potential of Alternative Photovoltaic Types. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(8), 269. <https://doi.org/10.3390/ijgi13080269>
- IEA (2024), Renewables 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>, Licence: CC BY 4.0
- Indu Rani, B., Srikanth, M., Saravana Ilango, G., & Nagamani, C. (2013). An active islanding detection technique for current controlled inverter. *Renewable Energy*, 51, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.019>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Renewable Power Generation Costs in 2021*.
- IRENA. (2023). *Renewable Power Generation Costs in 2022*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2022.pdf
- Islam, Md. R., Aziz, Md. T., Alauddin, M., Kader, Z., & Islam, Md. R. (2024). Sites suitability assessment for solar power plants in Bangladesh: A GIS-based analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach. *Renewable Energy*, 220, 119595–119595. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119595>
- Kahraman, C., Cebeci, U., & Ulukan, Z. (2003). Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP. *Logistics Information Management*, 16(6), 382–394. <https://doi.org/10.1108/09576050310503367>
- Karipoğlu, F., Koca, K., & İlbar, E. (2024). Convenient Site Selection of a Floating PV Power Plant in Türkiye by using GIS-Fuzzy Analytical Hierarchy Process. *Environmental Science and Pollution Research*, 31. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32470-3>
- Kaya, T., & Kahraman, C. (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 35(6), 2517–2527. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.051>

- Koohbanani, H., Barati, R., Yazdani, M. R., & Sakhdari, S. (2018). Groundwater recharge by selection of suitable sites for underground dams using a GIS-based fuzzy approach in semi-arid regions. In *Progress in River Engineering & Hydraulic Structures* (pp. 11–32). International Energy and Environment Foundation.
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- Luhaniwal, J., Agarwal, S., & Mathur, T. (2025). An integrated DEA-fuzzy AHP method for prioritization of renewable energy sources in India. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84891-2>
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science. In *Advances in Geographic Information Science*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Malinić, V., Durlević, U., Brašanac-Bosanac, L., Novković, I., Joksimović, M., Golić, R., & Krstić, F. (2025). A Hybrid Fuzzy AHP–MULTIMOORA Approach for Solar Energy Development on Rural Brownfield Sites in Serbia. *Sustainability*, 17(17), 7988–7988. <https://doi.org/10.3390/su17177988>
- Mierzwiak, M., & Calka, B. (2017). Multi-Criteria Analysis for Solar Farm Location Suitability. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 104(1), 20–32. <https://doi.org/10.1515/rgg-2017-0012>
- Mugiyo, H., Chimonyo, V. G. P., Sibanda, M., Kunz, R., Masemola, C. R., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2021). Evaluation of Land Suitability Methods with Reference to Neglected and Underutilised Crop Species: A Scoping Review. *Land*, 10(2), 125. <https://doi.org/10.3390/land10020125>
- Nassif, W. G., K. Al-Timimi, Y., & Elhmaidi, D. (2025). GIS-AHP for Optimal Solar Site Selection: A Case Study of Iraq and Its Implications for Climate Change. *International*

Journal of Sustainable Energy Planning and Management, 47, 71–89.
<https://doi.org/10.54337/ijsepm.10646>

Neri, A., Butturi, M. A., Scapinelli, A., Lolli, F., & Gamberini, R. (2025). *Renewable energy communities in rural areas: A hybrid GIS-MCDM approach for agrivoltaic systems site selection*. In *Proceedings of the 29th Summer School Francesco Turco*. Otranto, Italy.

Noorollahi, E., Fadaei, D., Akbarpour Shirazi, M., & Ghodsipour, S. (2016). Land Suitability Analysis for Solar Farms Exploitation Using GIS and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)—A Case Study of Iran. *Energies*, 9(8), 643. <https://doi.org/10.3390/en9080643>

Oladosu, S. O., Obayuna, S. F., Okoeka, G. E., & Aizesogie, E. O. (2025). Gis-Based Fuzzy Ahp Approach For Solar Farm Site Suitability Analysis In Egor, Benin City, Nigeria. *Fudma Journal Of Sciences*, 9(6), 208–221. <https://doi.org/10.33003/fjs-2025-0906-3725>

Onuoha, H., Denwigwe, I., Babatunde, O., Adebisi Abdulsalam, K., Adebisi, J., Emezirinwune, M., Okharedia, T., Akindayomi, A., Adisa, K., & Hamam, Y. (2025). Integrating GIS and AHP for Photovoltaic Farm Site Selection: A Case Study of Ikorodu, Nigeria. *Processes*, 13(1), 164–164. <https://doi.org/10.3390/pr13010164>

Öztaş, Ö., & Ervural, B. (2025). Integrating GIS and Fuzzy BWM for Solar PV Power Plant Site Selection: A Case Study of Konya, Turkey. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(1), 75–89. <https://doi.org/10.18466/cbayarfb.1589809>

Paula, K. F., Castilla, P., Pourakbari-Kasmaei, M., Heymann, F., Falcão, D., & Melo, J. D. (2025). GIS-Based Fuzzy-AHP Framework for Identifying Suitable Hubs for Offshore Wind and Clean Hydrogen Production. *IEEE Access*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3553704>

Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>

Polatidis, H., Haralambopoulos, D. A., Munda, G., & Vreeker, R. (2006). Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(2), 181–193. <https://doi.org/10.1080/009083190881607>

- Prieto-Amparán, J. A., Pinedo-Alvarez, A., Morales-Nieto, C. R., Valles-Aragón, M. C., Álvarez-Holguín, A., & Villarreal-Guerrero, F. (2021). A Regional GIS-Assisted Multi-Criteria Evaluation of Site-Suitability for the Development of Solar Farms. *Land*, 10(2), 217. <https://doi.org/10.3390/land10020217>
- Puengprasert, P., Chalobol, T., Sinbuathong, N., Srinophakhun, P., Thanapimmetha, A., Liu, C.-G., Zhao, X.-Q., & Sakdaronnarong, C. (2020). A combined cellulosic and starchy ethanol and biomethane production with stillage recycle and respective cost analysis. *Renewable Energy*, 157, 444–455. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.022>
- Roman, M., Rehman Tariq, M. A., Nadeem, A., Ullah, S., Ahmad, F., Haider, M. A. (2026). Suitability of Solar PV Plant Sites Using A Combined GIS-AHP And Remote Sensing Approach; A Case Study of Khanewal District, Pakistan, *Journal of Renewable Energy and Environment (JREE)*, 13(2), 29-43. <https://doi.org/10.30501/jree.2025.507408.2278>.
- Ryan, S., & Nimick, E. (2019, August 12). *Multi-Criteria Decision Analysis and GIS*. ArcGIS StoryMaps. <https://storymaps.arcgis.com/stories/b60b7399f6944bca86d1be6616c178cf>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. In *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
- Saaty, T., & Kułakowski, K. (2016, June 21). *Axioms of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and its Generalization to Dependence and Feedback: The Analytic Network Process (ANP)*. ArXiv.org. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.05777>
- Saaty, T.L. (2005). The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision making. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*; José, F., Salvatore, G., Matthias, E., Eds.; Springer: New York, NY, USA. pp. 345–405.
- Sahoo, S. K., Choudhury, B. B., Dhal, P. R., & Hanspal, M. S. (2025). A Comprehensive Review of Multi-criteria Decision-making (MCDM) Toward Sustainable Renewable

Energy Development. *Spectrum of Operational Research*, 2(1), 268–284.
<https://doi.org/10.31181/sor21202527>

Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & Socorro García-Cascales, M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544–556.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>

Sisman, S., & Aydinoglu, A. C. (2020). Using Gis-Based Multi-Criteria Decision Analysis Techniques In The Smart Cities. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-4/W3-2020, 383–389.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xliv-4-w3-2020-383-2020>

SolarPower Europe. (2023). *EU Market Outlook for Solar Power 2023–2027*.
<https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/eu-market-outlook-for-solar-power-2023-2027>

Sun, L., Jiang, Y., Guo, Q., Ji, L., Xie, Y., Qiao, Q., Huang, G., & Xiao, K. (2021). A GIS-based multi-criteria decision making method for the potential assessment and suitable sites selection of PV and CSP plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105306.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105306>

Tahri, M., Hakdaoui, M., & Maanan, M. (2015). The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1354–1362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.054>

Tamtam, F., & Tourabi, A. (2025). Integrating Fuzzy AHP and GRA for Strategic Evaluation and Decision-Making in Renewable Energy Technologies. *Interdisciplinary Journal of Information Knowledge and Management*, 20, 021–021.
<https://doi.org/10.28945/5578>

Tarife, R., Nakanishi, Y., Zhou, Y., Estoperez, N., & Tahud, A. (2023). Integrated GIS and Fuzzy-AHP Framework for Suitability Analysis of Hybrid Renewable Energy Systems: A Case in Southern Philippines. *Sustainability*, 15(3), 2372.
<https://doi.org/10.3390/su15032372>

Taylan, O., Alamoudi, R., Reda Kabli, M., AlJifri, A., Ramzi, F., & Herrera-Viedma, E. (2020). *Assessment of Energy Systems Using Extended Fuzzy AHP, Fuzzy VIKOR, and TOPSIS Approaches to Manage Non-Cooperative Opinions*. 12(7), 2745–2745. <https://doi.org/10.3390/su12072745>

Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. In *Applied Optimization*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>

Vagiona, D. G. (2021). Comparative Multicriteria Analysis Methods for Ranking Sites for Solar Farm Deployment: A Case Study in Greece. *Energies*, 14(24), 8371. <https://doi.org/10.3390/en14248371>

Vagiona, D. G., Tzekakis, G., Loukogeorgaki, E., & Karanikolas, N. (2022). Site Selection of Offshore Solar Farm Deployment in the Aegean Sea, Greece. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), 224. <https://doi.org/10.3390/jmse10020224>

Villacreses, G., Jijón, D., Nicolalde, J. F., Martínez-Gómez, J., & Betancourt, F. (2022). Multicriteria Decision Analysis of Suitable Location for Wind and Photovoltaic Power Plants on the Galápagos Islands. *Energies*, 16(1), 29. <https://doi.org/10.3390/en16010029>

Yildiz, O. A., Cebi, S., & Yildiz, O. (2025). Multicriteria decision support for sustainable energy planning: an evaluation of alternative scenarios for the solar power plant site selection. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05943-1>

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

Zandi, I., & Lotfata, A. (2025). Evaluating solar power plant sites using integrated GIS and MCDM methods: a case study in Kermanshah Province. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87476-9>

Zandi, I., Pahlavani, P., Lotfata, A., & Ata, B. (2025). A GIS-based fermatean fuzzy MCDM approach for identifying the optimal sites for solar power plant installation in Kermanshah Province. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19058-8>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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