

Πολυκριτηριακή Αξιολόγηση Επενδύσεων σε Έργα χωροθέτησης και κατασκευής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ελλάδα

Χρήστος Κ. Βασιλάκης

Πολεοδόμος, Χωροτάκτης Μηχανικός και Μεταπτ.
Φοιτητής ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

christos.vasilakis90@gmail.com, std123080@ac.eap.gr

Σεραφεΐμ Θ. Πολύζος

Καθηγητής Παν. Θεσσαλίας

και Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

polyzos.serafeim@ac.eap.gr

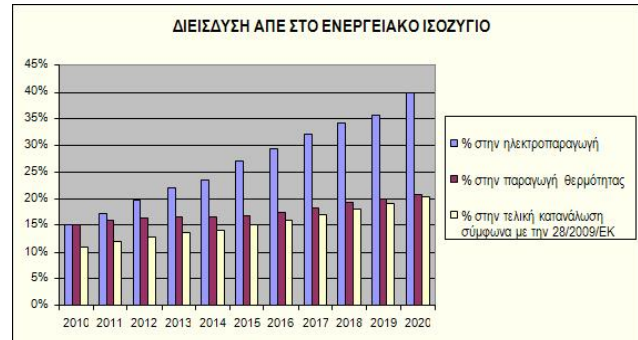
Περίληψη – Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός μεθοδολογικού πλαισίου για την επιλογή της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης Αιολικού Πάρκου, συνδυάζοντας την Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (ΠΚΑ) και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ). Πιο συγκεκριμένα στην ΠΚΑ εφαρμόζεται η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, λαμβάνοντας υπόψη Τεχνικά Κριτήρια, Οικονομικά Κριτήρια, Κριτήρια Κάλυψης Γης καθώς και Κοινωνικά Κριτήρια. Απώτερος σκοπός είναι η βελτιστοποίηση και ο εμπλουτισμός του ήδη υπάρχοντος μεθοδολογικού πλαισίου που σχετίζεται με τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την χωροθέτηση και εγκατάσταση έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Λέξεις-Κλειδιά: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Αιολικές Εγκαταστάσεις, Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων, Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία έτη η ολοένα και αυξανόμενη βιομηχανική και τεχνολογική ανάπτυξη του ανθρώπου είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης του παγκόσμιου πληθυσμού. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος ήταν η εμφάνιση των πρώτων οικολογικών προβλημάτων του πλανήτη καθώς και η εμφάνιση των «πετρελαϊκών» κρίσεων του '70. Συνεπώς, άρχισε αμέσως μετά η αναζήτηση διάφορων εναλλακτικών μορφών ενέργειας με σκοπό την εγκατάλειψη των έως τότε συμβατικών πηγών. Έτσι και στην Ελλάδα, οι πρώτες νομοθετικές ρυθμίσεις που αφορούσαν την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ ξεκινάει από το 1985 με το Ν. 1559, φθάνοντας έως το 2010 και το Ν. 3851, με τον οποίο καθορίζονται οι εθνικοί δεσμευτικοί στόχοι στην τελική κατανάλωση ενέργειας με βάση την Οδηγία 2009/28/ΕΚ. Σύμφωνα με τον τελευταίο, η συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας θα πρέπει να ανέρχεται σε ποσοστό 20% έως το 2020. (Σχήμα 1)

Στον ολοένα και αναπτυσσόμενο πλέον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σημαντική συνιστώσα αποτελεί ο χωροταξικός σχεδιασμός. Η μελέτη επιλογής της πλέον κατάλληλης θέσης εγκατάστασης ενός τέτοιου έργου αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα σχεδιασμού, το οποίο πρέπει να λαμβάνει υπόψη αρκετούς παράγοντες.



Σχήμα 1. Εθνικοί Δεσμευτικοί Στόχοι σύμφωνα με το Ν.3851/2010 και εκτίμηση διείσδυσης ΑΠΕ

Βέβαια ο χωροταξικός σχεδιασμός των ΑΠΕ δεν εμφανίστηκε από τα πρώτα βήματα κατασκευής και εγκατάστασης αυτών, δημιουργώντας αρκετά προβλήματα. Το 2008 εγκρίθηκε με το ΦΕΚ 2464 Β/03-12-2008 το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού, το οποίο διαμορφώνει πολιτικές χωροθέτησης έργων ΑΠΕ, καθορίζει ασύμβατες χρήσεις και ελάχιστες αποστάσεις εγκατάστασης. Επιπλέον, καθώς κατά κύριο λόγο το συγκεκριμένο πλαίσιο εστιάζει στα Αιολικά έργα, διακρίνει την χώρα σε κατηγορίες Αιολικής εγκατάστασης με βασικό κριτήριο το εν δυνάμει εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό. Στο πλαίσιο αυτό, εκτός από τους περιορισμούς που τίθενται από την κείμενη νομοθεσία, η εγκατάσταση ενός Αιολικού έργου θα πρέπει να λάβει υπόψη της και μιας σειράς τεχνικών παραγόντων, οικονομικών παραγόντων, παραγόντων χρήσεων γης και άλλων.

Βασικό αντικείμενο λοιπόν της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η δημιουργία ενός μεθοδολογικού πλαισίου με στόχο την εύρεση της πλέον κατάλληλης θέσης για την εγκατάσταση ενός Αιολικού Πάρκου, με κύριο πυλώνα την οικονομική αποδοτικότητα του έργου, διευρύνοντας και εμπλουτίζοντας με αυτόν τον τρόπο την έως σήμερα επιστημονική βιβλιογραφία.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

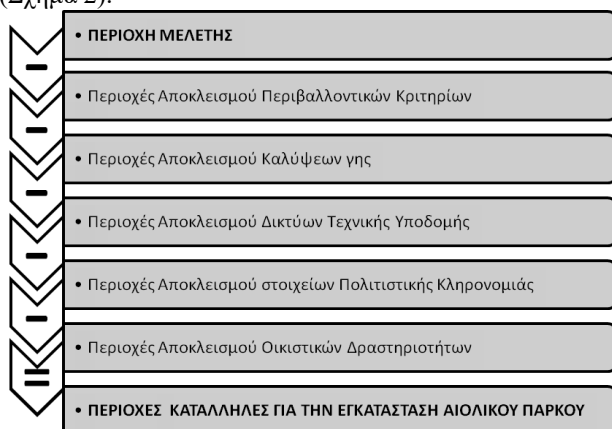
Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελείται από δύο στάδια και συνδυάζει τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) με την Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (ΠΚΑ).

A. Στάδιο 1: Εύρεση κατάλληλων περιοχών χωροθέτησης Αιολικού Πάρκου

Κατά το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας πραγματοποιείται ο αποκλεισμός των περιοχών και ζωνών ασυμβατότητας που ορίζονται κυρίως με το «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού» (ΦΕΚ 2464 Β/03-12-2008) και στις οποίες δεν είναι επιτρεπτή η εγκατάσταση ενός Αιολικού Πάρκου. Δημιουργούνται κατά συνέπεια ορισμένες κατηγορίες περιοχών αποκλεισμού, οι οποίες είναι οι κάτωθι:

- Περιοχές Αποκλεισμού Περιβαλλοντικών Κριτηρίων
- Περιοχές Αποκλεισμού Καλύψεων γης
- Περιοχές Αποκλεισμού Δικτύων Τεχνικής Υποδομής
- Περιοχές Αποκλεισμού στοιχείων Πολιτιστικής Κληρονομιάς
- Περιοχές Αποκλεισμού Οικιστικών Δραστηριοτήτων

Με την εφαρμογή του συγκεκριμένου σταδίου πραγματοποιείται η ανάδειξη των διαθέσιμων περιοχών στις οποίες η κατασκευή ενός τέτοιου έργου είναι σύμφωνο με την Ελληνική Νομοθεσία. Το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας εμφανίζεται στο ακόλουθο σχήμα. (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Διαγραμματική Απεικόνιση 1^{ου} Σταδίου Μεθοδολογίας

B. Στάδιο 2: Αξιολόγηση κατάλληλων περιοχών χωροθέτησης με εφαρμογή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (ΑΗΡ)

Το δεύτερο στάδιο της μεθοδολογίας σχετίζεται με την αξιολόγηση των διαθέσιμων περιοχών οι οποίες έχουν προκύψει από την υλοποίηση του πρώτου σταδίου αυτής. Πιο συγκεκριμένα, το δεύτερο στάδιο αποτελείται από τα κάτωθι διακριτά βήματα.

1. Προσδιορισμός και Επιλογή Κριτηρίων Αξιολόγησης

Πρωταρχικό βήμα του δεύτερου σταδίου της μεθοδολογίας αποτελεί η επιλογή των κριτηρίων βάση των οποίων θα γίνει η αξιολόγηση της διαθέσιμης προς εγκατάσταση γης για ένα Αιολικό Πάρκο. Εδώ προκύπτουν τέσσερις κατηγορίες κριτηρίων μαζί με τα υποκριτήρια τους και εμφανίζονται στον Πίνακα Ι.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι
ΟΜΑΔΕΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΥΤΩΝ

Ομάδες Κριτηρίων	Πρωτογενείς μεταβλητές (υποκριτήρια)
Τεχνικά Κριτήρια	- Αιολικό Δυναμικό - Κλίσεις Εδάφους
Οικονομικά Κριτήρια	- Απόσταση Οδικό δίκτυο - Απόσταση από Διασυνδεδεμένο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
Κριτήρια Χρήσεων γης	- Κάλυψη Γης - Πυκνότητα Αιολικών Εγκαταστάσεων
Κοινωνικά Κριτήρια	- Οπτική όχληση οικισμών - Οπτική όχληση αρχαιολογικών χώρων

2. Εφαρμογή Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (ΑΗΡ)

Επόμενο βήμα αποτελεί η δόμηση της ιεραρχίας του προβλήματος που πρέπει να αντιμετωπιστεί καθώς και η εφαρμογή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας μέσω των συγκρίσεων κατά ζεύγη.

Έπειτα μέσω της μέθοδος του ιδιοδιανύσματος υπολογίζονται τα σχετικά βάρη για κάθε υποκριτήριο καθώς και ο λόγος συνέπειας (CR).

3. Εισαγωγή Βαρών και επεξεργασία δεδομένων σε περιβάλλον ΓΣΠ

Εν συνεχεία πραγματοποιείται η εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων σε λογισμικό ΓΣΠ, όπου πραγματοποιείται η δημιουργία δευτερογενών μεταβλητών, η ομογενοποίηση των δεδομένων σε ενιαία τακτική κλίμακα αλλά με κοινό μέγεθος χωρικής μονάδας. Επιπλέον, συνδυάζονται οι σταθμισμένες μεταβλητές με σκοπό την οπτικοποίηση και εξαγωγή των συμπερασμάτων.

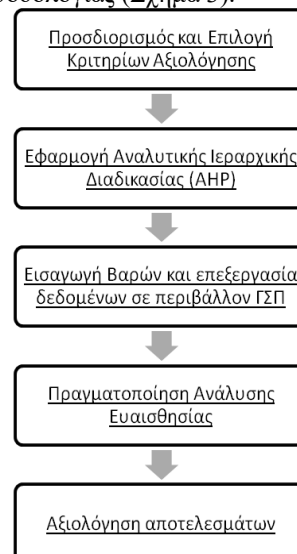
4. Πραγματοποίηση Ανάλυση Ευαισθησίας

Αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό βήμα κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, καθώς ελέγχει την ευαισθησία και την σταθερότητα των τελικών αποτελεσμάτων.

5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Τέλος πραγματοποιείται η εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων και ο προσδιορισμός των περιοχών όπου προκεντρώνουν υψηλή βαθμολογία καταλληλότητας για την εγκατάσταση του έργου.

Ακολουθεί η διαγραμματική απεικόνιση του δεύτερου σταδίου της μεθοδολογίας (Σχήμα 3).



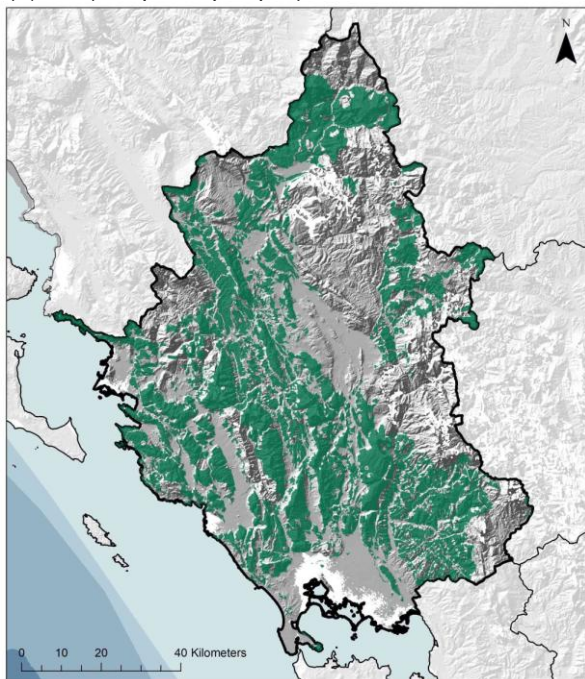
Σχήμα 3. Διαγραμματική Απεικόνιση 2^{ου} Σταδίου Μεθοδολογίας

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για την κατασκευή ενός Αιολικού Πάρκου στην Περιφέρεια Ηπείρου, η οποία αποτελεί την περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας. Μάλιστα πρέπει να αναφερθεί πως το Αιολικό Πάρκο θα αποτελείται από τυπικές Ανεμογεννήτριες, δηλαδή Ανεμογεννήτριες με διάμετρο πτερυγίων 85 μ.

A. Εφαρμογή 1^{ου} Σταδίου Μεθοδολογίας

Για την εφαρμογή του πρώτου σταδίου συλλέχθηκαν και εισήχθησαν στο λογισμικό πρόγραμμα ArcGIS 10 δεδομένα τα οποία προέρχονται από διαφορετικές πηγές όπως είναι ο Γεωπληροφοριακός Χάρτης της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας, η ιστοσελίδα ανοικτών γεωχωρικών δεδομένων geodata.gov.gr, κτλ. και προβλήθηκαν στο κοινό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ 87. Έπειτα μέσω του εργαλείου Model Builder του ArcGIS δημιουργήθηκε ένα τελικό διανυσματικό επίπεδο με τις τελικές περιοχές προς αξιολόγηση (Σχήμα 4), οι οποίες είναι σύμφωνες με την υφιστάμενη νομοθεσία. Το επίπεδο αυτό αποτελείται από 1.816 πολύγωνα διαφορετικών εμβαδών και συνολική επιφάνεια 3.354 km². Αποδεικνύεται συνεπώς πως άνω του 1/3 της συνολικής επιφάνειας της Περιφέρειας Ηπείρου ενδείκνυται για την εγκατάσταση του έργου σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία.



Σχήμα 4. Κατάλληλες περιοχές για την Εγκατάσταση Αιολικού Πάρκου στην Π. Ηπείρου

B. Εφαρμογή 2^{ου} Σταδίου Μεθοδολογίας

Κατά το δεύτερο στάδιο προσδιορίζουμε και συγκεκριμενοποιούμε τα κριτήρια / υποκριτήρια αξιολόγησης και πραγματοποιούμε την Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στα Οικονομικά Κριτήρια. Από αυτή τη διαδικασία αποδόθηκαν τα σχετικά βάρη μέσω της μεθόδου του Ιδιοδιανύσματος. Αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.

Έπειτα, όλα τα δεδομένα εισάγονται στο λογισμικό ArcGIS, τα οποία μετατρέπονται σε ψηφιδωτά επίπεδα (raster) με κοινό μέγεθος χωρικής μονάδας, δηλαδή μέγεθος κελιού (cell size) 100X100 μ. Εν συνεχεία, τα

δεδομένα μετατρέπονται σε κοινή κλίμακα αναφοράς και πραγματοποιούμε απλό σταθμισμένο άθροισμα (Weighted Sum).

ΠΙΝΑΚΑΣ III
ΤΕΛΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΒΑΡΩΝ

Πρωτογενείς μεταβλητές (υποκριτήρια)	Τελικά Βάρη
Αιολικό Δυναμικό	0,27256
Εδαφικές Κλίσεις	0,03894
Απόσταση από το Οδικό Δίκτυο	0,27425
Απόσταση από το Δίκτυο της ΔΕΗ	0,27425
Χρήσεις Γης	0,07283
Πυκνότητα Αιολικών Εγκαταστάσεων	0,01457
Οπτική όχληση οικισμών	0,02625
Οπτική όχληση αρχαιολογικών χώρων	0,02625

Πραγματοποιούμε δηλαδή την εφαρμογή του ακόλουθου τύπου για κάθε κελί (Tegou et al, 2010):

$$OSJ_i = \sum_{j=1}^n W_j * V_{ij}$$

Όπου,

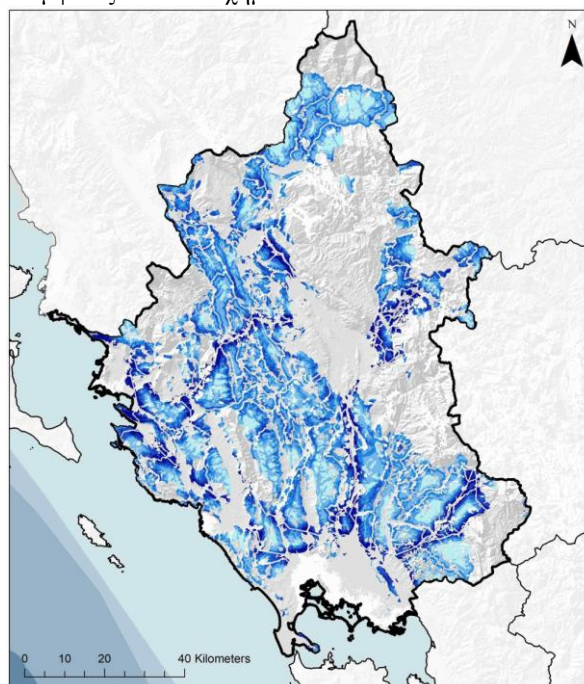
OSJ_i είναι ο αθροιστικός δείκτης καταλληλότητα για το κελί i,

W_j είναι ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου,

V_{ij} είναι η βαθμολογία του κελιού i υπό το πρίσμα του κριτηρίου j,

Και n είναι ο συνολικός αριθμός των κριτηρίων.

Κατά αυτό τον τρόπο εμφανίζεται ένα θεματικό επίπεδο το οποίο δείχνει το επίπεδο καταλληλότητας (έντονο μπλε – υψηλή καταλληλότητα, ανοιχτό μπλε – χαμηλή καταλληλότητα) της περιοχής μελέτης, το οποίο ομαδοποιείται σε 5 κλάσεις με την μέθοδο Natural Jenks και εμφανίζεται στο Σχήμα 5.

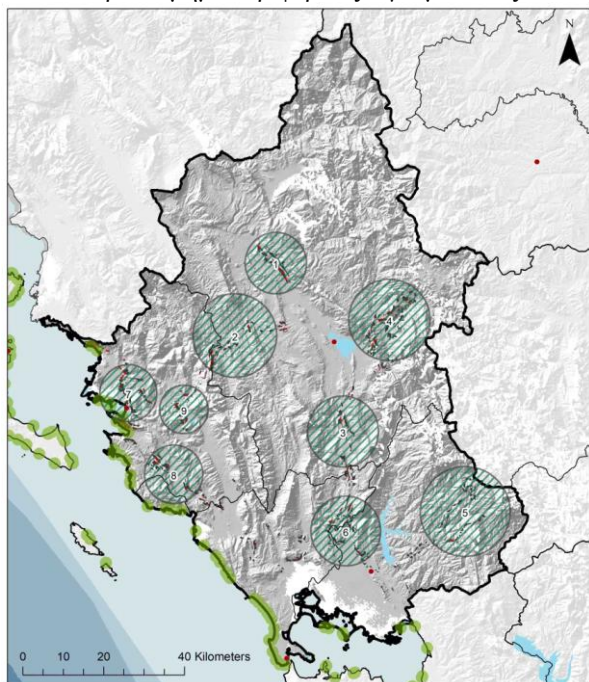


Σχήμα 5. Καταλληλότητα θέσεων χωροθέτησης Αιολικού Πάρκου στην Π. Ηπείρου

Από την επεξεργασία των ανωτέρω δεδομένων προκύπτει πως οι Περιφερειακές Ενότητες με τις μεγαλύτερες εκτάσεις οι οποίες είναι κατάλληλες για την εγκατάσταση του Αιολικού Πάρκου είναι αυτές των Ιωαννίνων και της Θεσπρωτίας. Έπειτα ακολουθούν οι Π.Ε. Άρτας και Πρέβεζας. Αντιστοίχως οι Π.Ε. στις οποίες εντοπίζονται οι μεγαλύτερες εκτάσεις με τις υψηλότερες βαθμολογίες είναι αυτές των Ιωαννίνων και

Θεσπρωτίας. Εν συνεχεία εντοπίζονται ορισμένες Χωρικές Ενότητες όπου συγκεντρώνονται πολύγωνα υψηλής βαθμολογίας. Αυτές είναι οι κάτωθι και εμφανίζονται στο Σχήμα 6.

- Βόρειο - Δυτικό τμήμα της Περιφέρειας Ιωαννίνων
- Δυτικό τμήμα Περιφέρειας Ιωαννίνων
- Νότιο τμήμα Περιφέρειας Ιωαννίνων
- Ανατολικό τμήμα Περιφέρειας Ιωαννίνων
- Ανατολικό τμήμα Περιφέρειας Άρτας
- Σύνορα Περιφερειών Άρτας και Πρεβέζης
- Βόρειο – Δυτικό τμήμα Περιφέρειας Ηγουμενίτσας
- Νότιο – Δυτικό τμήμα Περιφέρειας Ηγουμενίτσας
- Κεντρικό τμήμα περιφέρειας Ηγουμενίτσας



Σχήμα 6. Χωρικές Ενότητες συγκέντρωσης πολυγώνων υψηλής βαθμολογίας για την Εγκατάσταση Αιολικού Πάρκου στην Π. Ηπείρου

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικότερα έγινε μια προσπάθεια εντοπισμού και αξιολόγησης των πλέον κατάλληλων θέσεων στην Περιφέρεια Ηπείρου για την εγκατάσταση ενός Αιολικού Πάρκου, συμβάλλοντας έτσι στην διεύρυνση των διαθέσιμων έως και σήμερα σχετικών μεθοδολογιών.

Αξίζει να σημειωθεί πως η Π. Ηπείρου εντάσσεται στις Περιοχές Αιολικής Καταλληλότητας (Π.Α.Κ.), δηλαδή αποτελεί κομμάτι της ηπειρωτικής χώρας το οποίο δεν διαθέτει τα συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες περιοχές για την εγκατάσταση Αιολικών έργων, συνεπώς παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον ως περιοχή μελέτης. Ακόμη, αποτελεί μια Περιφέρεια η οποία δεν συμμετέχει ουσιαστικά στην εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας γίνεται αντιληπτό πως η θέση των υφιστάμενων Αδειών Παραγωγής ταυτίζεται χωρικά σε ένα μεγάλο βαθμό με τις κατάλληλες για εγκατάσταση περιοχές του Σταδίου 1. Επιπλέον, εξάγεται το συμπέρασμα πως οι υφιστάμενες Άδειες Παραγωγής που αφορούν τα Αιολικά Έργα στην Π. Ηπείρου παρουσιάζονται σε πολλές περιπτώσεις εντός των Χωρικών Ενοτήτων συγκέντρωσης υψηλής βαθμολογίας καταλληλότητας του Σταδίου 2 της μεθοδολογίας, συμπίπτουν όμως με τα πολύγωνα μεσαίας βαθμολογίας καταλληλότητας και όχι με τα πολύγωνα υψηλής βαθμολογίας. Τέλος, για την τελική επιλογή των θέσεων εγκατάστασης θα πρέπει να γίνει επιτόπια έρευνα (μελέτη πεδίου) στις Χωρικές Ενότητες όπου συγκεντρώνονται πολύγωνα υψηλής βαθμολογίας, είναι όμως βέβαιο πως οι Π.Ε Ιωαννίνων και Θεσπρωτίας θα πρέπει να αποτελέσουν προτεραιότητα σε μία πιθανή εγκατάσταση.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Νόμος 1559/85, Ρύθμιση θεμάτων εναλλακτικών μορφών ενέργειας και ειδικών θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις. ΦΕΚ 135Α'/25-7-85
- Νόμος 3851/10, Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. ΦΕΚ Α 85/4-6-2010
- Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με «την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ», εκδόθηκε στις 23 Απριλίου 2009
- ΦΕΚ 2464/Β/03-12-2008, Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού
- Tegou, L., H. Polatidis and D. Haralambopoulos, (2010). *Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study*, Journal of Environmental