

Η Επίδραση της Γεωγραφικής Διασποράς στην Απορρόφηση της Αιολικής Ισχύος στο Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτροπαραγωγής

Γιώργος Κάραλης¹, Κώστας Ράδος², Αρθούρος Ζερβός¹

1: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας

2: Τμήμα Τεχνολογιών Αντιρρύπανσης, ΤΕΙ Δυτ. Μακεδονίας

e-mail: gcaralis@central.ntua.gr

Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια αποτελεί την πλέον ώριμη τεχνολογικά και οικονομικά ανταγωνιστική ΑΠΕ. Η επίτευξη των Εθνικών στόχων για το 2020 για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την προστασία του περιβάλλοντος περνά σαφώς μέσα από το πρίσμα της μεγαλύτερης δυνατής αποδοτικής ενσωμάτωσης ανεμογεννητριών στο σύστημα.

Όσο πλουσιότερο το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής τόσο μεγαλύτερη αναμένεται η παραγόμενη αιολική ενέργεια. Έτσι, η εγκατάσταση αιολικών πάρκων, κατ' αρχάς, ενδείκνυται σε μέρη όπου υπάρχει αξιόλογο αιολικό δυναμικό και εκεί φυσιολογικά κατευθύνονται οι ιδιώτες επενδυτές με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του κέρδους. Από την άλλη πλευρά, η ικανότητα του συστήματος να απορροφήσει την αιολική ισχύ σχετίζεται από πολυάριθμους παράγοντες όπως η ζήτηση, τα χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων παραγωγής, η μεταφορική ικανότητα και η διαθεσιμότητα των διασυνδέσεων με τα γειτονικά ηλεκτρικά συστήματα, η ετήσια κατανομή της παραγόμενης αιολικής ισχύος, οι κανόνες διαχείρισης του ηλεκτρικού συστήματος, ακόμα και η χρήση και η αξιοπιστία μοντέλων πρόβλεψης του ανέμου και πρόγνωσης της αιολικής παραγωγής σε βραχυπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα.

Η ετήσια κατανομή της παραγόμενης αιολικής ισχύος, επηρεάζεται σαφώς από την γεωγραφική διασπορά των αιολικών πάρκων. Έτσι, ενώ η παραγόμενη αιολική ισχύς μιας ανεμογεννήτριας εμφανίζει κατά κανόνα σημαντικά χρονικά διαστήματα μηδενικής παραγωγής και ονομαστικής παραγωγής, όσο αυξάνεται η γεωγραφική διασπορά και εντάσσονται πολλά αιολικά πάρκα στο σύστημα, τόσο μειώνεται το χρονικό διάστημα με αθροιστικά μηδενική ή ονομαστική αιολική παραγωγή. Πρακτικά αυτό σημαίνει, ότι δεν συμβαίνει ταυτόχρονα να έχει άπνοια ή να φυσάει έντονα σε όλες τις περιοχές με αιολικά πάρκα (Σχήμα 1).

Στην προοπτική της μεγάλης διείσδυσης αιολικής ενέργειας στο σύστημα και στο πλαίσιο του γενικότερου ενεργειακού σχεδιασμού σε εθνικό επίπεδο, έχει απασχολήσει σε προηγούμενο άρθρο [Κάραλης Γ., Περιβολάρης Γ., Ράδος Κ., Ζερβός Α. (2007)], το ζήτημα της εγγυημένης ισχύος των αιολικών που σχετίζεται με την εγκατεστημένη συμβατική ισχύ που υποκαθίσταται αξιόπιστα από τα αιολικά πάρκα. Στην παρούσα εργασία, διερευνάται η σημασία της γεωγραφικής διασποράς των αιολικών στην απορρόφηση της αιολικής ισχύος, ζήτημα που σχετίζεται με τη λειτουργία των συμβατικών μονάδων που υποκαθίσταται από την αιολική παραγωγή.

Συνεπώς, η απάντηση στο τεχνολογικό ζήτημα της εγγυημένης ισχύος, γενικά συμβάλει στο μακροπρόθεσμο εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό και στον καθορισμό των απαιτούμενων εγκατεστημένων μονάδων. Από την άλλη πλευρά, το ζήτημα της απορρόφησης της αιολικής ισχύος λαμβάνει υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς, τη διαχείριση του ηλεκτρικού συστήματος, τον προγραμματισμό της λειτουργίας των μονάδων και τον καταμερισμό του φορτίου, με σκοπό να μεγιστοποιήσει την απορρόφηση αιολικής ισχύος, αλλά και να εξασφαλίσει την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Η μεγιστοποίηση της απορρόφησης της αιολικής ισχύος με διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος είναι ζήτημα μείζονος σημασίας σε ένα Σύστημα όπως το Ελληνικό που χαρακτηρίζεται από περιορισμένη διασυννοριακή μεταφορική ικανότητα. Η διατύπωση συμπερασμάτων στο συγκεκριμένο τεχνολογικό ερώτημα συνεισφέρει άμεσα στο σχεδιασμό για την επίτευξη των στόχων της διείσδυσης των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή και της μείωσης των ρύπων. Παράλληλα, διαφυλάσσει σε σημαντικό βαθμό την αποδοτικότητα των επενδύσεων για τον ιδιώτη επενδυτή.

Έτσι, στο πλαίσιο των ποικίλων συζητήσεων που εξελίσσονται τον τελευταίο καιρό αναφορικά με την προοπτική μεγάλης διείσδυσης αιολικής ενέργειας στο σύστημα, σύμφωνα με τους υψηλούς δεσμευτικούς στόχους της χώρας μας για την συνεισφορά των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο, η επίδραση της γεωγραφικής διασποράς των αιολικών πάρκων στην απορρόφηση της αιολικής ισχύος είναι αδιαμφισβήτητο ότι πρέπει να συνεκτιμηθεί, παράλληλα με το υπό διαμόρφωση χωροταξικό πλαίσιο για τις ΑΠΕ και τον ευρύτερο μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό της χώρας.

Για την διερεύνηση του σύγχρονου τεχνολογικού ζητήματος, της επίδρασης της γεωγραφικής διασποράς των αιολικών μηχανών στην απορρόφηση της αιολικής ισχύος, αναπτύχθηκε μια σύγχρονη και καινοτόμος μεθοδολογία, η οποία βασίζεται σε πιθανοθεωρητική ανάλυση, κάνοντας επιπλέον χρήση προτύπου πρόγνωσης ανέμου για την αναπαράσταση του αιολικού δυναμικού σε οποιαδήποτε εν δυνάμει περιοχή εγκατάστασης ανά την επικράτεια. Στο παρόν, περιγράφονται κατ' αρχήν οι βασικές αρχές της μεθοδολογίας. Εν συνεχεία, αφού καθοριστούν τα δεδομένα και οι υποθέσεις εργασίας, εξετάζονται και αξιολογούνται ενδεικτικά σενάρια διείσδυσης ανεμογεννητριών στο Σύστημα από όπου και διατυπώνονται σχετικά συμπεράσματα και προτάσεις. Ταυτόχρονα, αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα των εξειδικευμένων αριθμητικών μεθόδων (όπως των προτύπων πρόγνωσης ανέμου) και η χρησιμότητά τους σε ένα συνολικό σχεδιασμό με σκοπό την επίτευξη των Εθνικών στόχων για το 2020.

2. Μεθοδολογία Εκτίμησης Απορρόφησης Αιολικής Ισχύος

Οι βασικές αρχές και τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται για την εκτίμηση της αιολικής ισχύος που μπορεί να απορροφηθεί από το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα με ασφάλεια παρουσιάζονται στα ακόλουθα. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται, στηρίζεται στη μεθοδολογία της ΡΑΕ για την εκτίμηση της ετησίας αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από ένα αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, με προσαρμογή των αρχών και των παραδοχών σύμφωνα με τις ανάγκες ενός μεγάλου ηλεκτρικού συστήματος.

Η μεθοδολογία εξετάζει τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος και λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ζήτησης, τη σύνθεση και τη λειτουργία των συμβατικών σταθμών παραγωγής, τους τεχνικούς περιορισμούς για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος, καθώς και τα ανεμολογικά δεδομένα στις εξεταζόμενες θέσεις εγκατάστασης.

Η μεθοδολογία έχει ως στόχο την εκτίμηση της αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ετησίως το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα. Η αιολική εγκατεστημένη ισχύς που εξετάζεται καλύπτει το εύρος μέχρι 5000MW, ενώ παράλληλα εξετάζονται εναλλακτικά σχέδια χωροθέτησης.

2.1. Βασικές Αρχές

Προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι η θεώρηση κανόνων διαχείρισης του συστήματος. Σε ένα ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα με σημαντική διείσδυση αιολικής ενέργειας, είναι βέβαιο ότι οι κανόνες αυτοί θα διαφέρουν από την σημερινή πρακτική. Οι βασικές αρχές που ακολουθούνται είναι οι εξής:

- Βασική αρχή της μεθοδολογίας είναι η εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας του συστήματος και η παροχή ικανοποιητικής ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, με ταυτόχρονη επιδίωξη τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο.
- Η μεθοδολογία εξετάζει το θέμα μόνο από τεχνικής πλευράς και δεν λαμβάνει υπόψη τα οικονομικά στοιχεία της λειτουργίας του συστήματος.
- Λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά των συμβατικών και υδροηλεκτρικών μονάδων καθώς και τα χαρακτηριστικά του φορτίου μέσω της ετήσιας καμπύλης διάρκειας.
- Θεωρείται ότι η συνολικά παραγόμενη αιολική ισχύς μπορεί να ελέγχεται, έτσι ώστε να μπορεί να μειωθεί αν αυτό απαιτηθεί από το σύστημα.
- Οι ανεμολογικές συνθήκες εισάγονται μέσω χρονοσειρών ταχυτήτων ανέμου που έχουν παραχθεί με χρήση μεσοκλιματικού μοντέλου πρόβλεψης ανέμου σε όλη την επικράτεια. Έτσι, δεδομένης της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος σε κάθε περιοχή και των αντιπροσωπευτικών καμπύλων ισχύος, υπολογίζεται η παραγόμενη αιολική ισχύς. Αθροίζοντας την παραγόμενη αιολική ισχύ στις διάφορες περιοχές προκύπτει η συνολική διαθέσιμη αιολική ισχύς για κάθε χρονικό «παράθυρο» (π.χ. μια ώρα), συνεπώς προκύπτει και η ετήσια κατανομή της παραγόμενης αιολικής ισχύος για κάθε σενάριο χωροθέτησης.
- Ακολουθείται η βασική αρχή ότι οι συμβατικές μονάδες του συστήματος δεν θα πρέπει να φορτίζονται κάτω από τα τεχνικά ελάχιστα όρια φορτίσεώς τους¹.
- Ταυτόχρονη, χρονικά απότομη και απρόβλεπτη ολική απώλεια των αιολικών, θεωρείται εντελώς απίθανο να συμβεί² [Ackermann T. (2005)], ειδικά όσο η γεωγραφική διασπορά αυξάνεται³, οδηγώντας πρακτικά σε μείωση της απαιτούμενης θερμής εφεδρείας. Η απαιτούμενη θερμή εφεδρεία μπορεί να ληφθεί σε μικρό ποσοστό (π.χ. 20%) της παραγωγής των αιολικών με σκοπό οι ενταγμένες συμβατικές μονάδες να μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση, σε μια ακραία περίπτωση⁴.
- Μεθοδολογικά, ειδική μεταχείριση απαιτείται για τις υδροηλεκτρικές μονάδες, δεδομένης της προγραμματισμένης και ελεγχόμενης λειτουργίας τους. Θεωρείται ότι οι υδροηλεκτρικές μονάδες, λειτουργούν τις ώρες αιχμής, και ότι η λειτουργία τους δεν περιορίζει την απορρόφηση της αιολικής ισχύος. Επιπρόσθετα, τα αιολικά συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση πολύτιμου νερού στους ταμιευτήρες των υδροηλεκτρικών. Πράγματι, πιθανή ανάγκη περικοπής αιολικής ισχύος συμβαίνει είτε τις ώρες χαμηλής ζήτησης, είτε τις ώρες με μεγάλη αιολική παραγωγή. Κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης, οι υδροηλεκτρικές μονάδες δεν χρησιμοποιούνται, ενώ τις ώρες με μεγάλη αιολική παραγωγή, ακόμα και αν η ζήτηση είναι υψηλή, οι υδροηλεκτρικές μονάδες αποσυνδέονται ή περιορίζουν τη λειτουργία τους, εξοικονομώντας νερό για ώρες με μεγαλύτερη ανάγκη (υψηλή ζήτηση, χωρίς άνεμο).
- Επιπλέον, τίθεται όριο για τη στιγμιαία διείσδυση αιολικής ισχύος, δεδομένου ότι οι διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος από τους αιολικούς σταθμούς μπορεί να έχουν

¹ Με τα σημερινά δεδομένα, οι λιγνιτικές μονάδες έχουν ιδιαίτερα υψηλά τεχνικά ελάχιστα μεταξύ 50-70% ενώ τα τεχνικά ελάχιστα της πλειοψηφίας των πετρελαϊκών μονάδων που λειτουργούν με μαζούτ είναι μεταξύ 40-50% της ονομαστικής ισχύος. Για μονάδες ελαφρού πετρελαίου και φυσικού αερίου τα όρια είναι χαμηλότερα.

² Υπό την προϋπόθεση συστηματικής χρήσης μοντέλων πρόβλεψης από τον διαχειριστή του συστήματος.

³ Σε συστήματα του μεγέθους της Δανίας, ολική απώλεια των αιολικών είτε λόγω απότομης μείωσης της ταχύτητας του ανέμου, είτε λόγω της ταυτόχρονης έλευσης μιας θύελλας από όλα τα αιολικά πάρκα και υπέρβασης της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας [Söder (1992)] θεωρείται απίθανο να συμβεί. Επιπρόσθετα σε σύνθετη τοπογραφία, όπως είναι η Ελληνική, τα μετεωρολογικά μέτωπα εμφανίζουν έντονες ασυνέχειες, με αποτέλεσμα έντονη ριπή ανέμου να είναι πρακτικά αδύνατο να πλήξει ταυτόχρονα όλες τις ανεμογεννήτριες. Αντίστοιχα, η γεωγραφική διασπορά αναπόφευκτα οδηγεί σε σύνδεση των αιολικών πάρκων σε διαφορετικές γραμμές μεταφοράς, συνεπώς και η ολική απώλεια των αιολικών λόγω διαταραχής στο σύστημα μεταφοράς θεωρείται απίθανο να συμβεί.

⁴ Ένα τέτοιο μικρό ποσοστό θερμής εφεδρείας θεωρείται ικανοποιητικό για την ασφάλεια του συστήματος, δεδομένου ότι τα μεσοκλιματικά μοντέλα πρόβλεψης εμφανίζουν πολύ καλή αξιοπιστία σε περιπτώσεις με έντονο άνεμο, ενώ το σφάλμα αυξάνεται όταν ο άνεμος είναι περιορισμένος σε ένταση [Rados K. et al (2007)]. Σε αυτή την περίπτωση όμως, λόγω ακριβώς της περιορισμένης συνεισφοράς της αιολικής ενέργειας, δεν δημιουργείται πρόβλημα στη διαχείριση και την ασφάλεια του συστήματος ακόμα και αν υπάρξει αστοχία της πρόβλεψης.

δυσμενείς επιπτώσεις στη διατήρηση της συχνότητας εντός των επιτρεπομένων ορίων ή ακόμα και στην ευστάθεια του συστήματος. Αυτό το όριο επηρεάζεται σημαντικά από τη γεωγραφική διασπορά. Σε συστήματα του μεγέθους της Ελλάδας, θα μπορούσε να γίνει αποδεκτή ακόμα και ιδιαίτερα υψηλή τιμή για τη στιγμιαία διείσδυση⁵ της τάξεως του 80-100%, διότι σε σενάρια ευρύτερης γεωγραφικής διασποράς το συνολικό σφάλμα της πρόβλεψης μειώνεται [H.Holttinen (2005)] και οι διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής περιορίζονται [Rosas P. (2003)]. Στην παρούσα ανάλυση, και προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι από την ασφαλή πλευρά, χρησιμοποιείται ως βασική τιμή στιγμιαίας επιτρεπόμενης ισχύος το 50% της ζήτησης, ενώ γίνεται και ανάλυση ευαισθησίας στο εύρος 30-100%.

- Εντούτοις, ακόμα και αν επιτραπεί μεγάλη στιγμιαία διείσδυση της αιολικής ενέργειας, και αποδειχθεί στην πράξη η υψηλή αξιοπιστία των μοντέλων πρόβλεψης ανέμου, η διαχείριση των μεγάλων θερμοηλεκτρικών μονάδων αποτελεί ένα σημαντικό εμπόδιο για τη μεγάλη διείσδυση και απορρόφηση αιολικής ισχύος. Ιδιαίτερα οι λιγνιτικές ατμοστροβιλικές μονάδες που αποτελούν τις μονάδες βάσης του σημερινού ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος δεν είναι οικονομοτεχνικά αποδεκτό να ανοιγοκλείνουν σε μικρή ή και μεσαία χρονική κλίμακα (π.χ. μικρότερη της εβδομάδας). Εξυπακούεται λοιπόν ότι σε ένα «αυριανό» ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα με μεγάλη αιολική διείσδυση, απαιτείται προσαρμογή του τρόπου λειτουργίας, έτσι ώστε να διευκολύνεται η απορρόφηση της αιολικής ισχύος. Συνεπώς, θα απαιτηθεί οι βαριές μονάδες που δυσχεραίνουν τη διαχείριση του συστήματος, να χρησιμοποιούνται ως «μονάδες αιχμής» πάρα ως μονάδες βάσης. Αυτό δεν σημαίνει ότι θα αυξομειώνουν την παραγωγή τους για να παρακολουθούν τις αυξομειώσεις της αιχμής της ζήτησης, αλλά ότι θα εντάσσονται αποκλειστικά κατά τις ευρύτερες περιόδους μεγάλης ζήτησης, ενώ τις περιόδους χαμηλής ζήτησης το σύστημα θα στηρίζεται σε εύελικτες μονάδες φυσικού αερίου και αεριοστροβιλικές πετρελαϊκές μονάδες που διευκολύνουν την απορρόφηση της αιολικής ενέργειας⁶.
- Η διασύνδεση της χώρας με τις γειτονικές χώρες (Σχήμα 2) είναι μικρής ικανότητας⁷ ενώ η προτεραιότητα της χρήσης αυτών των διασυνδέσεων επί του παρόντος δεν είναι προσανατολισμένη στη διασυνοριακή μεταφορά αιολικής ισχύος. Συνεπώς, το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα θεωρείται ως απομονωμένο σύστημα, περιορισμένης μεταφορικής ικανότητας και στην παρούσα ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη οποιαδήποτε επίπτωση της διασύνδεσης στην αύξηση της απορρόφησης της αιολικής ενέργειας⁸.
- Η μεθοδολογία καθορίζει τη δυνατότητα απορρόφησης αιολικής ενέργειας από το σύστημα σε ετήσια βάση. Η ενέργεια αυτή κατανέμεται σε όλους τους αιολικούς σταθμούς ανάλογα με τις ανάγκες του ηλεκτρικού συστήματος. Συνεπώς μπορεί να προκύψει ανάγκη για μεγαλύτερη περικοπή αιολικής ενέργειας σε περιοχές με υψηλή συγκέντρωση αιολικής ενέργειας, και καθόλου περικοπή σε περιοχές μικρής συγκέντρωσης και με αρνητική συσχέτιση του ανέμου ως προς τις υπόλοιπες περιοχές.
- Η εκτίμηση της αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί γίνεται με πιθανοτική ανάλυση, όπου οι πιθανοτικές μεταβλητές είναι η αθροιστική αιολική ισχύς και η ζήτηση του φορτίου, οι οποίες θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους.

⁵ Σε διάφορες περιοχές στον κόσμο, έχει καταγραφεί πολύ υψηλή στιγμιαία διείσδυση. Για παράδειγμα στη Δανία το 2002, η στιγμιαία διείσδυση της αιολικής ενέργειας άγγιξε για πρώτη φορά, παγκοσμίως, το 100% [H. Holttinen (2004)].

⁶ Η μεγάλη διείσδυση της αιολικής ενέργειας δυσχεραίνεται με την ανάπτυξη βαρέων μονάδων άνθρακα (λιγνίτη ή λιθάνθρακα), και πολύ περισσότερο πυρηνικών σταθμών. Η Πορτογαλία υλοποιεί ένα φιλόδοξο πρόγραμμα μεγιστοποίησης της διείσδυσης των αιολικών με παράλληλη ανάπτυξη υδροηλεκτρικών.

⁷ Το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα συνδέεται μέσω καλωδίων 400 και 150kV με τα συστήματα της Αλβανίας, Βουλγαρίας και Σκόπια, και με υποβρύχιο καλώδιο 400kV συνεχούς τάσεως με την Ιταλία.

⁸ Οι διασυνδέσεις μεταξύ των χωρών θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης αιολικής ενέργειας, αλλά πριν αυτό υλοποιηθεί απαιτούνται – ειδικά στην περιοχή της Νότιο-Ανατολικής Ευρώπης – μέτρα ενίσχυσης του δικτύου και βελτίωσης των κανονιστικών ρυθμίσεων.

2.2. Απαιτούμενα στοιχεία

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι τα εξής:

- Η ετήσια καμπύλη διάρκειας του φορτίου του συστήματος.
- Τα χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων παραγωγής, και ειδικότερα η σειρά ένταξης των συμβατικών μονάδων, η μέγιστη ικανότητα παραγωγής κάθε μονάδας και το τεχνικό της ελάχιστο.
- Τα χαρακτηριστικά των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής, και ειδικότερα η μέγιστη ικανότητα παραγωγής της κάθε μονάδας, η ετήσια συνολική ενεργειακή συνεισφορά των υδροηλεκτρικών με διαφοροποίηση σε καλό και κακό υδραυλικό έτος και ο προγραμματισμός της λειτουργίας τους.

Για την εξέταση σεναρίων γεωγραφικής διασποράς των αιολικών, απαιτείται ταυτόχρονη πληροφορία για τον άνεμο σε όλες τις εξεταζόμενες περιοχές. Η πληροφορία αυτή προκύπτει με χρήση του επιχειρησιακού μετεωρολογικού προτύπου COAMPS που αναπτύχθηκε από το τμήμα Ναυτικής Μετεωρολογίας του Εργαστηρίου Θαλασσιών Ερευνών (Naval Research Laboratory) των ΗΠΑ. Από την εφαρμογή του προτύπου (Σχήμα 3), παρέχεται η δυνατότητα αναπαραγωγής ταυτόχρονων χρονοσειρών ανέμου στη μεσοκλίμακα για ολόκληρη την επικράτεια (Σχήμα 4). Η παραμετροποίηση και προσαρμογή του προτύπου έγινε κατ' αρχήν λαμβάνοντας υπόψη αποτελέσματα προγνώσεων ανέμου άλλων επιχειρησιακών προτύπων που χρησιμοποιούν Εθνικοί Μετεωρολογικοί φορείς καθώς και σύγχρονα μετρητικά δεδομένα από δίκτυο συστημάτων καταγραφής ανέμου. Παράλληλα εφαρμόζεται διορθωτικός συντελεστής με σκοπό να ενσωματωθεί η επιτάχυνση που παρατηρείται σε περιοχές εγκατάστασης αιολικών πάρκων (Σχήμα 5).

2.3 Πιθανοθεωρητική Ανάλυση

Για την εκτίμηση της ετήσιας αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί με ασφάλεια από το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Προσδιορίζονται M καταστάσεις ζήτησης (π.χ. $M=100$). Για κάθε κατάσταση ζήτησης i , η ισχύς του φορτίου είναι P_{Li} και η διάρκειά της είναι h_i ώρες ετησίως. Η αντίστοιχη λοιπόν πιθανότητα να συμβεί είναι $f(P_{Li})=h_i/8760$, $i=1,M$. Εφαρμόζοντας, για όλες τις M καταστάσεις φόρτισης του συστήματος προκύπτει η πιθανοτική κατανομή της ζήτησης.
- Προσδιορίζονται N (π.χ. $N=80$) καταστάσεις παραγόμενης αιολικής ισχύος. Για κάθε κατάσταση παραγόμενης αιολικής ισχύος j , η παραγόμενη αιολική ισχύς είναι P_{Wj} και πιθανότητα $g(P_{Wj})$, $j=1,N$, να συμβεί εντός του έτους. Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς για όλες τις καταστάσεις παραγόμενης αιολικής ισχύος, προκύπτει η κατανομή πιθανότητας της παραγόμενης αιολικής ισχύος.
- Εφαρμόζεται συνέλιξη των δύο παραπάνω διακριτών κατανομών πιθανότητας, δηλαδή της ζήτησης φορτίου και της παραγόμενης αιολικής ισχύος. Προκύπτει λοιπόν ένας πίνακας $M*N$ και η πιθανότητα κάθε κατάστασης του πίνακα είναι: $\Pi_{ij}(P_{Li}, P_{Wj})=f(P_{Li}) g(P_{Wj})$.
- Για κάθε κατάσταση (i,j) υπολογίζεται η δυνάμενη να απορροφηθεί αιολική ισχύς με δεδομένα την ζήτηση P_{Li} και την προβλεπόμενη αιολική παραγωγή P'_{Wj} . Η δυνάμενη να απορροφηθεί αιολική ισχύς προκύπτει από τους δύο περιορισμούς των τεχνικών ελαχίστων των ενταγμένων συμβατικών μονάδων και της στιγμιαίας επιτρεπόμενης διείσδυσης των αιολικών. Οι απαιτούμενες ενταγμένες συμβατικές μονάδες και συνεπώς τα τεχνικά τους ελάχιστα προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη την λειτουργία των υδροηλεκτρικών και την εκτίμηση της παραγωγής των αιολικών. Εάν η ζήτηση είναι υψηλή (ώρα αιχμής) τότε προκύπτει παραγόμενη υδροηλεκτρική ισχύς P_{Hi} (Σχήμα 6). Η αιολική ισχύς -λόγω της γεωγραφικής διασποράς και της χρήσης των μοντέλων πρόβλεψης- θεωρείται αρκετά προβλέψιμη στις διακυμάνσεις της, απαιτώντας θερμή συμβατική εφεδρεία σε μικρό ποσοστό της. Εάν, η πρόβλεψη της παραγόμενης αιολικής ισχύος είναι P'_{Wj} , τότε οι συμβατικές μονάδες που απαιτείται να ενταχθούν, προκύπτουν σύμφωνα με τη σειρά

ένταξής τους και πρέπει να έχουν μέγιστη ικανότητα MA_{Cij} : $MA_{Cij} \geq P_{Li} - P_{Hi} - (1 - \varepsilon) \cdot P'_{Wj}$, όπου ε είναι το ποσοστό των αιολικών για το οποίο απαιτείται θερμή εφεδρεία συμβατικών (π.χ. $\varepsilon=20\%$). Συνεπώς, προκύπτει ο αριθμός των ενταγμένων συμβατικών μονάδων N_{Cij} και τα τεχνικά τους ελάχιστα TM_{Cij} . Λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη επιτρεπόμενη στιγμιαία συμμετοχή των αιολικών δ στην κάλυψη της ζήτησης, προκύπτει η δυνατότητα απορρόφησης αιολικής ισχύος: $P_{Absorbed_ij} = \text{Minimum}\{P_{Li} - TM_{Cij}, \delta \cdot P_{Li}\}$. Είναι σαφές από τον τρόπο προσδιορισμού των απαιτούμενων συμβατικών μονάδων και των τεχνικών τους ελαχίστων, ότι ο δεύτερος όρος της αγκύλης είναι αυτός που διαμορφώνει τη δυνατότητα απορρόφησης αιολικής ισχύος του συστήματος. Επισημαίνεται ότι το μέγεθος αυτό αποτελεί την δυνατότητα απορρόφησης αιολικής ισχύος και όχι την πραγματικά απορροφούμενη αιολική ενέργεια.

- Στη συνέχεια για κάθε λειτουργική κατάσταση (i,j) , μπορεί να ελεγχθεί εάν προκύπτει ανάγκη περικοπής της αιολικής ισχύος ή όχι. Συνεπώς, προκύπτει η απορροφούμενη $P_{W \rightarrow A_ij}$, και η περικοπόμενη αιολική ισχύς $P_{W \rightarrow C_ij}$:

$$P_{W \rightarrow A_ij} = \begin{cases} P_{Wj}, & \text{εάν } P_{Wi} < P_{Absorbed_ij} \\ P_{Absorbed_ij}, & \text{εάν } P_{Wi} \geq P_{Absorbed_ij} \end{cases}$$

$$P_{W \rightarrow C_ij} = P_{Wi} - P_{W \rightarrow A_ij} = \begin{cases} P_{Wi} - P_{Absorbed_ij}, & \text{εάν } P_{Wi} < P_{Absorbed_ij} \\ 0, & \text{εάν } P_{Wi} \geq P_{Absorbed_ij} \end{cases}$$

- Συμπληρωματικά, απαιτείται μια διόρθωση στα τελικά μεγέθη, που σχετίζεται με την ορθολογική παραδοχή ότι τα υδροηλεκτρικά δεν περιορίζουν την απορρόφηση αιολικής ισχύος. Επομένως, προκύπτει η τελική παραγωγή των υδροηλεκτρικών P'_{Hi} και η τελική περικοπόμενη αιολική ισχύς $P'_{W \rightarrow C_ij}$:

$$\begin{aligned} P'_{Hi} &= P_{Hi} - P_{W \rightarrow C_ij} \quad \text{και} \quad P'_{W \rightarrow C_ij} = 0, & \text{εάν } P_{W \rightarrow C_ij} \leq P_{Hi} \\ P'_{Hi} &= 0 \quad \text{και} \quad P'_{W \rightarrow C_ij} = P_{W \rightarrow C_ij} - P_{Hi}, & \text{εάν } P_{W \rightarrow C_ij} > P_{Hi} \end{aligned}$$

- Αθροίζοντας όλες τις πιθανότητες των λειτουργικών καταστάσεων στις οποίες παρατηρείται περικοπή αιολικής ισχύος, υπολογίζεται η ετήσια απορροφούμενη και περικοπόμενη αιολική ενέργεια, ο πραγματικός συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας και η ενεργειακή συνεισφορά της αιολικής ενέργειας.

2.4 Εκτίμηση Αιολικής Ενεργειακής Παραγωγής

Για την εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής από τα αιολικά, καθορίζονται αρχικά οι θέσεις ενδιαφέροντος ανά την επικράτεια. Πρόκειται για περιοχές όπου έχουν αναπτυχθεί ή υπάρχει δυναμική για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων και προεπιλέγονται αξιολογώντας τα υπάρχοντα δεδομένα. Δηλαδή:

- τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα, εκείνα που πρόκειται να εγκατασταθούν άμεσα (κατέχουν άδεια εγκατάστασης), αλλά και το γενικότερο επιχειρηματικό ενδιαφέρον όπως προκύπτει από τις εκδοθείσες άδειες παραγωγής και τις επιπλέον αιτήσεις των επενδυτών (Σχήμα 7).
- τους Χάρτες Ανέμου Μεσοκλίμακας MACH,
- τις περιοχές αιολικής προτεραιότητας (ΠΑΠ), όπως περιγράφονται στο σχέδιο για το ΕΧΠ για τις ΑΠΕ (Σχήμα 8), καθώς και το γενικότερο σκεπτικό του,
- διαθέσιμες μετρήσεις από δίκτυο μετρητικών ιστών από τις οποίες αποτυπώνεται με σαφήνεια το αιολικό δυναμικό σε τοπικό επίπεδο σε περιοχές με ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Κάνοντας χρήση τυπικών καμπύλων ισχύος, με βάση τις αριθμητικά αναπαραγόμενες χρονοσειρές ανέμου στα σημεία ενδιαφέροντος, προκύπτει η εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής από αιολικά για το εκάστοτε εξεταζόμενο σενάριο διεύθυνσης.

3. Αντικειμενικά Δεδομένα και Υποθέσεις Εργασίας

3.1 Εύρος Διείσδυσης στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Το σχέδιο του Ειδικού ΕΧΠ για τις ΑΠΕ δίνει βαρύτητα στην ηπειρωτική χώρα (μετριάζοντας το ενδεχόμενο μεγάλης διείσδυσης στα νησιά) και χαρακτηρίζει τρεις κύριες περιοχές ιδιαίτερης ανάπτυξης αιολικών (χαρακτηριζόμενες ως ΠΑΠ: Περιοχές Αιολικής Προτεραιότητας) όπου τα κριτήρια στο ΕΧΠ για εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι ευνοϊκά, ενώ επαναφέρει στο προσκήνιο και την περιοχή του νομού Αττικής. Ειδικότερα, προβλέπει εγκαταστάσεις 960MW στην ΠΑΠ1, 3237MW στην ΠΑΠ2, 876MW στην ΠΑΠ3 και 100MW στην Αττική, αλλά και επιπλέον εγκαταστάσεις στην λοιπή επικράτεια, στις λεγόμενες ΠΑΚ (Περιοχές Αιολικής Καταλληλότητας), εφόσον πληρούνται κατάλληλες προϋποθέσεις.

Στις περιπτώσεις εφαρμογής που ακολουθούν μελετώνται σενάρια γεωγραφικής διασποράς των αιολικών κυρίως στο υπάρχον διασυνδεδεμένο Σύστημα, αλλά παράλληλα εξετάζονται και σενάρια ενσωμάτωσης αιολικών πάρκων στα νησιά, σύμφωνα με τα σενάρια και τις μελέτες διασύνδεσης τους [Μ. Παπαδόπουλος, Σ. Παπαθανασίου, Μ. Τσίλη, Ε. Καραμάνου (2006)].

Για την Ελλάδα, το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας πρέπει να ανέλθει, μέχρι το 2020, σε 29%. Η επίτευξη των στόχων αυτών προϋποθέτει εγκαταστάσεις αιολικών της τάξης των 5000MW τουλάχιστον στο διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό Σύστημα.

3.2 Πληροφοριακά Στοιχεία Συστήματος

Στο ηπειρωτικό διασυνδεδεμένο Σύστημα, η έως τώρα συνεισφορά της αιολικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα περιορισμένη και η ζήτηση κυρίως καλύπτεται από συμβατικές μονάδες. Σύμφωνα με τη ΜΑΣΜ 2006-2010, η συμβατική εγκατεστημένη ισχύς (συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων υδροηλεκτρικών) είναι 11234.3MW. Το ηλεκτρικό Σύστημα της ηπειρωτικής Ελλάδας αποτελείται από 33 συμβατικές μονάδες, εκ των οποίων 22 λιγνιτικές (5288MW), 4 πετρελαϊκές (750MW), 4 μονάδες συνδυασμένου κύκλου (1630MW), 3 μονάδες φυσικού αερίου (507.8MW), καθώς και αρκετές υδροηλεκτρικές (3058.5MW). Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι του 2006, με ζήτηση 49GWh και αιχμή 10,3GW.

3.3 Αξιολόγηση Ανεμολογικών Δεδομένων- Επιλογή Τύπου Ανεμογεννητριών

Οι περιπτώσεις εφαρμογής βασίστηκαν σε ανεμολογικά δεδομένα του 2006. Τα δεδομένα αρχικά αξιολογήθηκαν ως εξής: λαμβάνοντας τις χρονοσειρές που προκύπτουν στις περιοχές των υφιστάμενων αιολικών πάρκων και χρησιμοποιώντας μια τυπική καμπύλη ισχύος 0.65MW (αντιστοιχεί με καλή προσέγγιση στο μέσο μέγεθος των εγκατεστημένων Α/Γ το έτος 2006) εκτιμήθηκε η αιολική παραγωγή και προέκυψε συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας ίσος με 27,1%. Η πολύ καλή σύμπτωση που παρατηρείται με τον αντίστοιχο συντελεστή όπως προκύπτει από τα στοιχεία του ΔΕΣΜΗΕ (27.38%) επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της μεθόδου και την εγκυρότητα των παραδοχών και των ανεμολογικών δεδομένων. Υιοθετείται το μέγεθος των 2MW για τις επιπλέον Α/Γ που πρόκειται να εγκατασταθούν στις υποψήφιες θέσεις, οπότε και χρησιμοποιείται μια αντίστοιχη τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας.

3.4 Σενάρια Χωροθέτησης

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό της αιολικής ισχύος που δύναται να απορροφηθεί από το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα, εφαρμόστηκε για ένα εύρος εγκατεστημένης ισχύος, με άνω όριο τα 5000MW, λαμβάνοντας υπόψη τη σημερινή κατάσταση (“ΣΚ”), δηλαδή τα αιολικά πάρκα που βρίσκονται σε λειτουργία στο διασυνδεδεμένο σύστημα, καθώς επίσης και όσα

έχουν ήδη άδεια εγκατάστασης, δηλαδή σύνολο ~1400MW. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη η σχετική ποσόστωση που αναλογεί στις περιοχές ΠΑΠ και στην Αττική, σύμφωνα με την κατανομή του σχεδίου του ΕΧΠ, δηλαδή 18.6% στην ΠΑΠ1, 62.6% στην ΠΑΠ2, 16.9% στην ΠΑΠ3 και 1.9% στην Αττική. Θεωρήθηκαν τα εξής σενάρια χωροθέτησης:

- “Α”: Εγκατάσταση επιπλέον αιολικών πάρκων μόνο στις περιοχές ΠΑΠ και στην Αττική, σύμφωνα με τα ποσοστά που αναλογούν στην κατανομή του σχεδίου.
- “Β”: Εγκατάσταση επιπλέον αιολικών πάρκων, σε ποσοστό 50% στις περιοχές ΠΑΠ και στην Αττική, σύμφωνα με τον ως άνω καταμερισμό, και κατά το υπόλοιπο 50% σε περιοχές ΠΑΚ όπου υπάρχει καλό αιολικό δυναμικό.
- “Γ”: Εγκατάσταση επιπλέον αιολικών πάρκων, σε ποσοστό 50% στις περιοχές ΠΑΠ και στην Αττική, σύμφωνα με τον ως άνω καταμερισμό, και κατά το υπόλοιπο 50% σε Νησιά.
- “Δ”: Εγκατάσταση επιπλέον αιολικών πάρκων, κατά το 1/3 στις περιοχές ΠΑΠ και στην Αττική, σύμφωνα με τον ως άνω καταμερισμό, κατά 1/3 σε περιοχές ΠΑΚ και κατά το υπόλοιπο 1/3 σε Νησιά.

Η επιλογή των περιοχών ΠΑΚ έγινε με κριτήριο το καλό αιολικό δυναμικό σε μια ευρεία γεωγραφική διασπορά. Ενδεικτικά ως περιοχές ΠΑΚ θεωρήθηκαν επιλεγμένες περιοχές της κεντρικής Μακεδονίας (στο Ν. Κιλκίς, Πέλλα, Φλώρινα και Καστοριάς), της Ηπείρου (στο Ν. Ιωαννίνων), της Θεσσαλίας (στο Ν. Τρικάλων, Λάρισα και Καρδίτσας) της Πελοποννήσου (στο Ν. Αχαΐας και Αργολίδας) και στα Επτάνησα (Κεφαλονιά και Κέρκυρα). Ενώ στα νησιά, για τις περιπτώσεις που εξετάζονται, επιλέχθηκαν ενδεικτικά η Χίος, η Λέσβος, η Λήμνος, οι Κεντρικές Κυκλάδες, και η Σκύρος.

Ο επιμέρους διαχωρισμός εγκατεστημένης ισχύος στις περιπτώσεις εφαρμογής καταγράφεται στον επισυναπτόμενο πίνακα 1 και 2.

4. Παρουσίαση - Ανάλυση Αποτελεσμάτων

4.1. Γενικά συμπεράσματα

Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας και την αποτύπωση των αποτελεσμάτων (Σχήματα 9-15) επιβεβαιώνονται κατ' αρχήν κάποια γενικότερα συμπεράσματα όπως:

- Η απορροφούμενη αιολική ισχύς μειώνεται με την αύξηση της διείσδυσης αιολικής ενέργειας, με συνέπεια την μείωση του πραγματικού συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας και κατ' επέκταση της οικονομικής απόδοσης των αιολικών πάρκων.
- Παράλληλα, η αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, έχει ως συνέπεια την σταδιακή μείωση της ενεργειακής συνεισφοράς, λόγω της περικοπής της περίσσειας αιολικής ισχύος. Συνεπώς, η δυνατότητα απορρόφησης αιολικής ισχύος του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό.
- Το ποσοστό της απορριπτόμενης αιολικής ισχύος είναι μεγαλύτερο στα σενάρια με ισχυρότερο αιολικό δυναμικό. Ωστόσο, σε αυτά τα σενάρια η ωφέλιμη αιολική ενέργεια είναι περισσότερη, παρά την μεγάλη απόρριψη. Συνεπώς, το κριτήριο πρέπει να είναι η ενεργειακή συνεισφορά και όχι το ποσοστό απορρόφησης αιολικής ενέργειας.
- Η επίδραση της γεωγραφικής διασποράς είναι ιδιαίτερα σημαντική. Τα σενάρια με τη μεγαλύτερη γεωγραφική διασπορά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ενεργειακή συνεισφορά, λόγω ένταξης περιοχών με καλύτερο αιολικό δυναμικό (διασύνδεση νησιών), και λόγω ένταξης περιοχών με μέτριο αιολικό δυναμικό αλλά ασυσχέτιστο άνεμο.
- Σε καλό υδροηλεκτρικό έτος αυξάνεται η απορρόφηση αιολικής ισχύος.
- Τα αποτελέσματα επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη στιγμιαία επιτρεπόμενη διείσδυση αιολικής ενέργειας, τον τρόπο διαχείρισης και τη σειρά ένταξης των συμβατικών μονάδων.

4.2. Αξιολόγηση Σεναρίων Μεγάλης Διείσδυσης

Από την ανάλυση των σεναρίων “Α”, “Β”, “Γ”, “Δ” και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (Σχήματα 9, 10, 11) προκύπτουν τα ακόλουθα ειδικά συμπεράσματα:

- Τα σενάρια με το ισχυρότερο αιολικό, είναι κατά σειρά το “Γ” λόγω των νησιών και μετά το “Α” λόγω των περιοχών ΠΑΠ, ενώ τα σενάρια με το ασθενέστερο είναι το “Δ” και “Β” λόγω της ένταξης περιοχών ΠΑΚ (Σχήμα 9).
- Το σενάριο “Α”, δηλαδή αυτό που δίνει βαρύτητα στις περιοχές ΠΑΠ και την Αττική, όπως ακριβώς παρουσιάζεται και στο σχέδιο του ΕΧΠ για τις ΑΠΕ, παρουσιάζει την μικρότερη απορρόφηση αιολικής ισχύος. Συνεπώς αν και χαρακτηρίζεται από ισχυρό αιολικό δυναμικό, η ενεργειακή του συνεισφορά υπολείπεται των σεναρίων Γ και Δ, ειδικά για μεγάλη αιολική διείσδυση.
- Με την ένταξη των περιοχών ΠΑΚ στο σενάριο Β, αν και το ποσοστό απορρόφησης αιολικής ισχύος είναι το υψηλότερο, δεν εξασφαλίζεται σημαντική ενεργειακή συνεισφορά λόγω του χαμηλού αιολικού δυναμικού.
- Στην υποτιθέμενη περίπτωση ένταξης των νησιών (σενάριο “Γ”) αντί των περιοχών ΠΑΚ, η ενεργειακή συνεισφορά αυξάνεται, λόγω του ισχυρού αιολικού δυναμικού (μέγιστος θεωρητικός συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας). Η ενεργειακή συνεισφορά –που είναι και το ζητούμενο- μεγιστοποιείται στο σενάριο Γ και στο σενάριο Δ για μεγάλη αιολική διείσδυση. Στην απορρόφηση αιολικής ενέργειας αρχικά υπερτερεί το αιολικό δυναμικό (που είναι ισχυρό στα νησιά), αλλά όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς, υπερτερεί ο ρόλος της διασποράς και της κατανομής της παραγόμενης ισχύος γύρω από την μέση τιμή (στοιχείο που ενισχύεται με εγκαταστάσεις σε διεσπαρμένες περιοχές ΠΑΚ).
- Συνεπώς, η παράλληλη ανάπτυξη σε περιοχές ΠΑΠ, ΠΑΚ και νησιά (Σενάριο Δ), έχει πολλαπλά οφέλη, διότι συνδυάζει περιοχές με ισχυρό αιολικό δυναμικό, αλλά και μεγιστοποίηση της γεωγραφικής διασποράς σε ασυσχέτιστες ανεμολογικά περιοχές. Όπως και παραπάνω, στην ενεργειακή συνεισφορά αρχικά υπερτερεί το αιολικό δυναμικό, αλλά όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς, ενισχύεται ο ρόλος της διασποράς.
- Η ενεργειακή συνεισφορά αγγίζει το 20% και αναφέρεται στο διασυνδεδεμένο σύστημα, για τα στοιχεία ζήτησης του 2006. Το όφελος από την ευρύτερη γεωγραφική διασπορά προσεγγίζει το 1% μεγαλύτερης ενεργειακής συνεισφοράς για εγκατεστημένη αιολική ισχύ 5000MW. Το ποσοστό απορρόφησης είναι 86% και ο πραγματικός συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας περιορίζεται στο 22,5% (από 28% που είναι ο θεωρητικός). Τα 5000MW αντιστοιχούν σε διείσδυση ίση με το 89% του μέσου ετήσιου φορτίου του συστήματος.
- Τέλος, να σημειωθεί ότι όλα τα αιολικά πάρκα δεν θα έχουν την ίδια απόρριψη. Περιοχές που είναι λιγότερο συσχετισμένες με όλες τις υπόλοιπες θα έχουν μεγαλύτερα ποσοστά απορρόφησης και άρα μεγαλύτερα έσοδα ακόμα και αν υστερούν σε αιολικό δυναμικό.

4.3. Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη στιγμιαία επιτρεπόμενη διείσδυση των αιολικών

Για το σενάριο “Δ” και εγκατεστημένη αιολική ισχύ 5000MW, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη στιγμιαία επιτρεπόμενη διείσδυση των αιολικών για καλό και για κακό υδροηλεκτρικό έτος (Σχήματα 13-15). Από την ανάλυση αναδεικνύεται η σημασία αυτής της παραμέτρου και η ανάγκη επανασχεδιασμού του ενεργειακού συστήματος με κριτήριο την ένταξη μονάδων (π.χ. υδροηλεκτρικών, φυσικού αερίου και αεριοστροβίλων) που διευκολύνουν την επίτευξη μεγαλύτερων τιμών στιγμιαίας διείσδυσης των αιολικών και οδηγούν σε μεγαλύτερη απορρόφηση της αιολικής ισχύος.

5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η απορρόφηση της αιολικής ισχύος αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο, το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον ενεργειακό σχεδιασμό για την αποδοτικότερη ενσωμάτωση των αιολικών

πάρκων και την άρση των όποιων τεχνολογικών ζητημάτων ανακύπτουν εξαιτίας της στοχαστικότητας του ανέμου. Έτσι, απαιτείται να καθοριστεί η αιολική ενέργεια που δύναται να απορροφηθεί με ασφάλεια, καθώς και η επίδραση που έχει η γεωγραφική διασπορά.

Η συστηματική καταγραφή των προγνώσεων ανέμου και οι παραγόμενοι μεσοκλιματικοί αιολικοί χάρτες παρέχουν τη δυνατότητα αξιόπιστης εκτίμησης της ετήσιας απορρόφησης αιολικής ενέργειας. Έτσι, υποκαθίσταται η ανάγκη ύπαρξης ταυτόχρονων μετρήσεων σε πολλαπλά σημεία. Στους υπολογισμούς που διεξήχθησαν θεωρήθηκαν σημειακές χρονοσειρές ανέμου ως αντιπροσωπευτικές για ευρύτερες περιοχές κάλυψης. Θα πρέπει να τονιστεί πως η χρήση δεδομένων με την παραπάνω παραδοχή παρέχει συμπεράσματα προς την ασφαλή πλευρά, δεδομένου ότι στην πραγματικότητα ο άνεμος παρουσιάζει ποικίλες διακυμάνσεις ανάμεσα στα σημεία ενδιαφέροντος.

Από τους υπολογισμούς αυτούς, καθίσταται σαφές ότι η γεωγραφική διασπορά συμβάλλει ευεργετικά στο ποσοστό απορρόφησης της αιολικής ισχύος. Ως εκ τούτου, η υπερσυγκέντρωση αιολικών μονάδων, σε ευρύτερες έστω περιοχές, δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Συνυπολογίζοντας τις θετικές επιπτώσεις της διεσπαρμένης παραγωγής στην μείωση των απωλειών μεταφοράς, στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων και στην παροχή εγγυημένης ισχύος, προκύπτει ότι σε επίπεδο εθνικού σχεδιασμού θα πρέπει να προωθηθεί η εγκατάσταση αιολικών πάρκων οπουδήποτε σε τοπικό επίπεδο υπάρχει προφανώς ισχυρό, αλλά ακόμα και μέτριο αιολικό δυναμικό. Έτσι, θα πρέπει να καθοριστούν ισοδύναμα κριτήρια ανάπτυξης αιολικών πάρκων σε όλη την επικράτεια, εφόσον πληρούνται οι περιβαλλοντικοί όροι, ενώ βεβαίως τα έργα αυτά θα πρέπει να κρίνονται ως αμιγώς περιβαλλοντικά.

Τέλος, εκτιμάται ότι θα πρέπει να γίνει επαναπροσέγγιση -ως προς τις δυνατότητες εκμετάλλευσης- του αιολικού δυναμικού των νησιών που είναι ανεξάντλητο και να τεθούν οι βάσεις για τη διασύνδεσή τους.

6. Ευχαριστίες

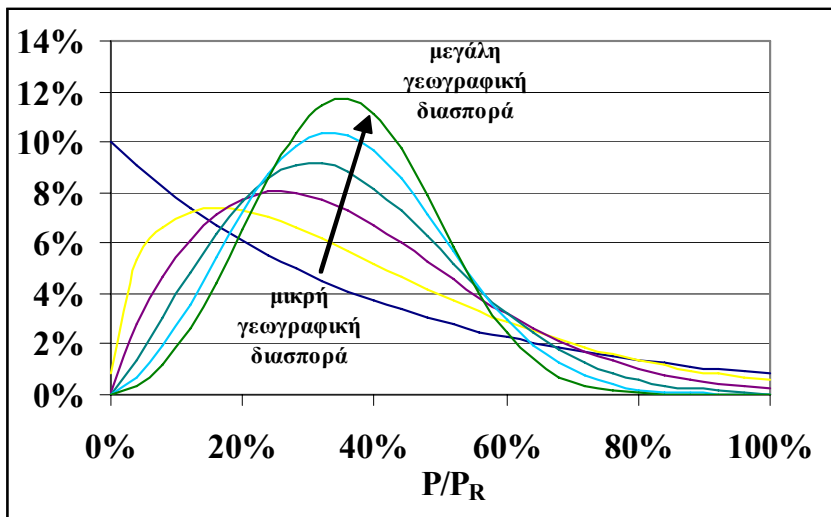
Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον Γιάννη Περιβολάρη και την εταιρεία Inflow για την πρόθυμη παροχή ανεμολογικών δεδομένων και την αναπαραγωγή χρονοσειρών ανέμου για όλα τα σημεία ενδιαφέροντος από τους χάρτες Ανέμου Μεσοκλίμακας MACH.

Αναφορές - Πηγές

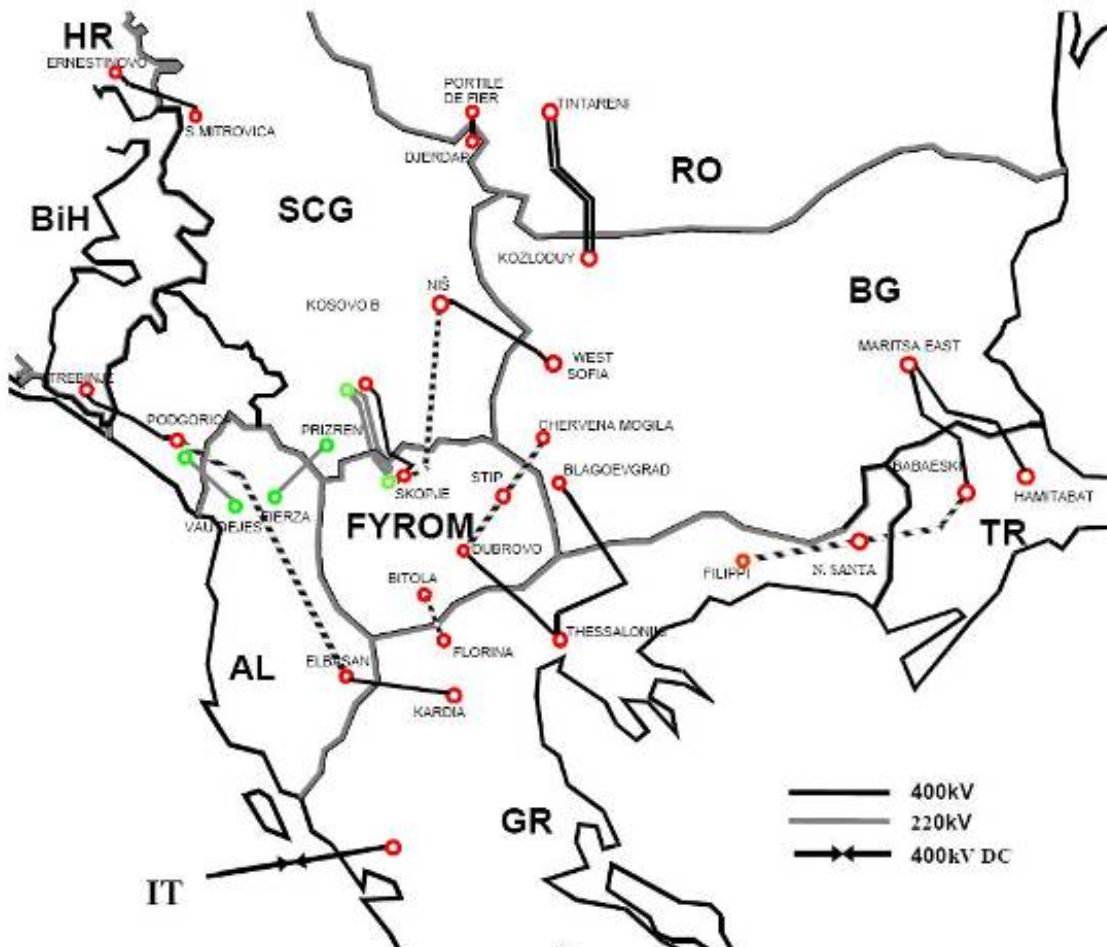
- EWEA, “Large scale integration of wind energy in the European power supply: Analysis, issues and recommendations”, December 2005.
- Ackermann T., “Wind Power in Power Systems”, 2005.
- Κάραλης Γ., Περιβολάρης Γ., Ράδος Κ., Ζερβός Α. (2007) «Η Επίδραση της Γεωγραφικής Διασποράς στην Παροχή Εγγυημένης Αιολικής Ισχύος στο Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτροπαραγωγής» Περιοδικό Ανεμολόγια, Τεύχος 44 & 45, ΕΛΕΤΑΕΝ, 2007.
- G.Caralis, Y.Perivolaris, K.Rados, A.Zervos, (2008) “On the Effect of Spatial Dispersion of Wind Power Plants on the Wind Energy Capacity Credit in Greece”, Environmental Research Letters, Volume 3, 015003 (13pp), January-March 2008.
- H.Holttinen (2005), “Optimal electricity market for wind power”, Energy Policy, Vol.33, No.16. November 2005, pp. 2052-2063.
- Perivolaris Y., Vougiouka A., Alafouzou V., Mourikis D., Zagorakis V., Rados K., Barkouta D., Zervos A., Qing W., “Coupling of a Mesoscale Atmospheric Prediction System with a CFD Microclimatic Model for Production Forecasting of Wind Farms in Complex Terrain: Test Case in the Island of Evia”, EWEC Athens 2006.
- Rados K., Perivolaris Y., Vougiouka A., Venezis K., Caralis G., Zervos A., “Application of a Mesoscale Weather Prediction Model for Short-term Forecasting of Power Production of

- Wind Farms in Complex Terrain - Test case: Island of Crete”, CEST2007, Cos Island, Greece September 2007.
- Söder L. (1992), “Reserve Margin Planning in a Wind-Hydro-Thermal Power System”, 92WM 168-5 PWRs, presented at IEEE/PES Winter Meeting, New York, 26-30 January 1992; published in IEEE Transactions on Power Systems 8(2) 564-571.
 - Rosas P. (2003), “Dynamic influences of wind power on the power system”, PhD thesis, Ørsted Institute and Technical University of Denmark, March 2003.
 - Hannele Holttinen (2004), “The impact of large scale wind power production on the Nordic electricity system”, VTT Technical Research Centre of Finland.
 - Μ. Παπαδόπουλος, Σ. Παπαθανασίου, Μ. Τσίλη, Ε. Καραμάνου, «Στρατηγική μελέτης διασύνδεσης νησιωτικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας – Προκαταρκτικές μελέτες», Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
 - “Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Σχέδιο ΚΥΑ, Φεβρουάριος 2007.
 - “Εθνικό Πληροφοριακό Σύστημα για την Ενέργεια”, ΥΠΑΝ.
 - “ΜΑΣΜ 2006-2010: Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς, Περίοδος 2006-2010”, ΔΕΣΜΗΕ, Ιαν 2006.
 - “Συνοπτικά Πληροφοριακά Δελτία για τις ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ”, ΔΕΜΣΗΕ, Ιαν 2004-Μαρ 2007.
 - “Μηνιαία Δελτία Ισοζυγίου Ηλεκτρικής Ενέργειας στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα”, ΔΕΣΜΗΕ, Ιαν 2004-Μαρ 2007.

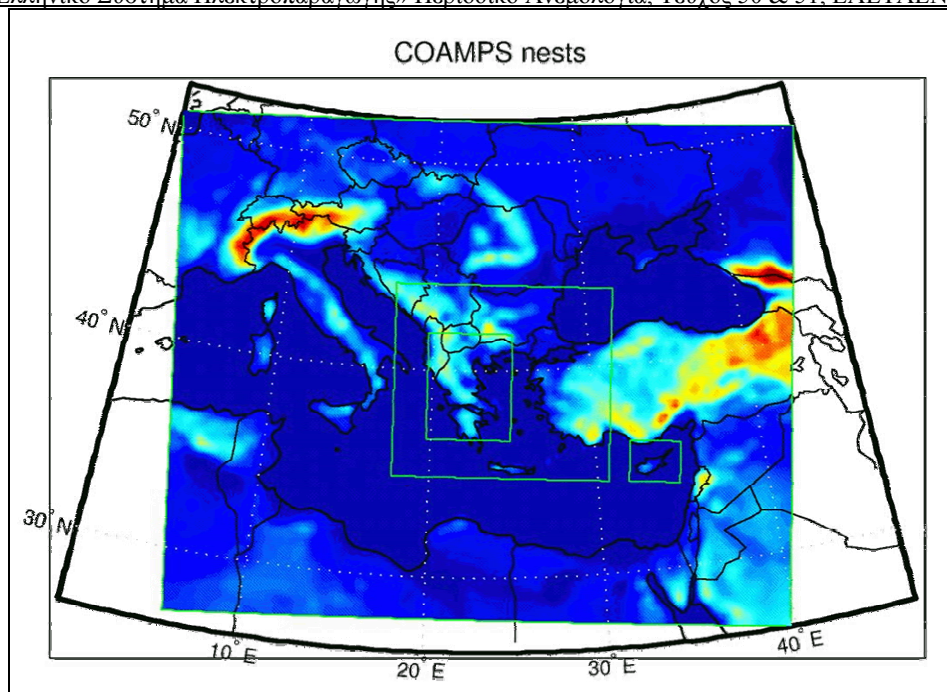
Σχήματα



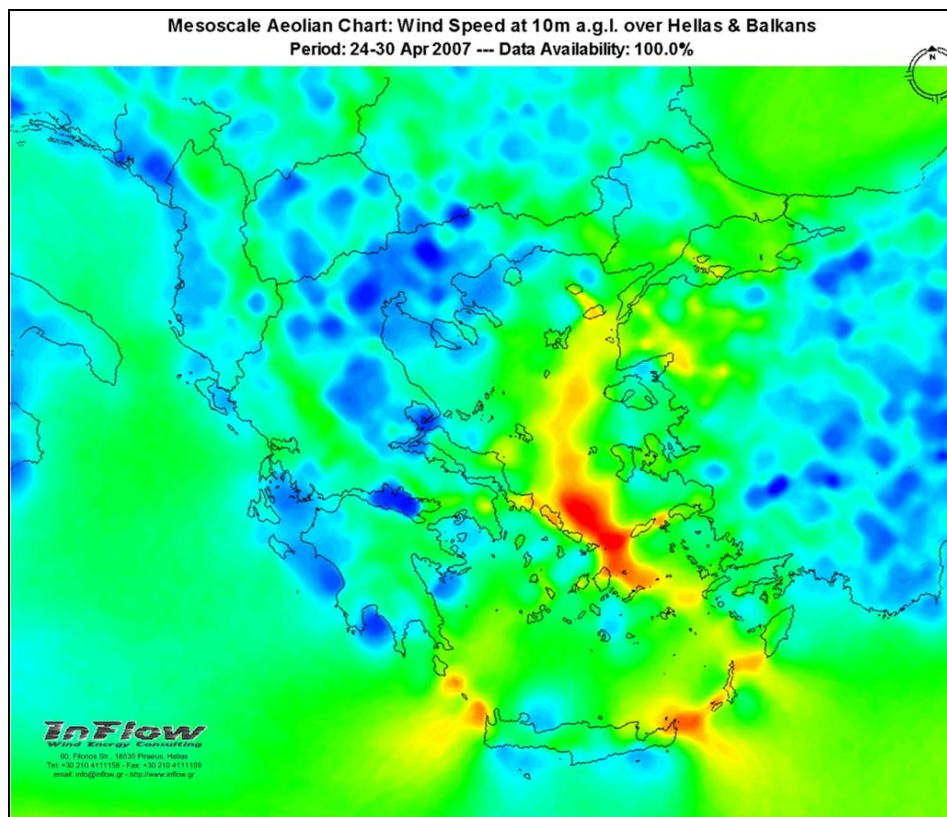
Σχήμα 1. Τυπική μορφή της επίδρασης της γεωγραφικής διασποράς στη συχνότητα εμφάνισης της παραγόμενης αιολικής ισχύος



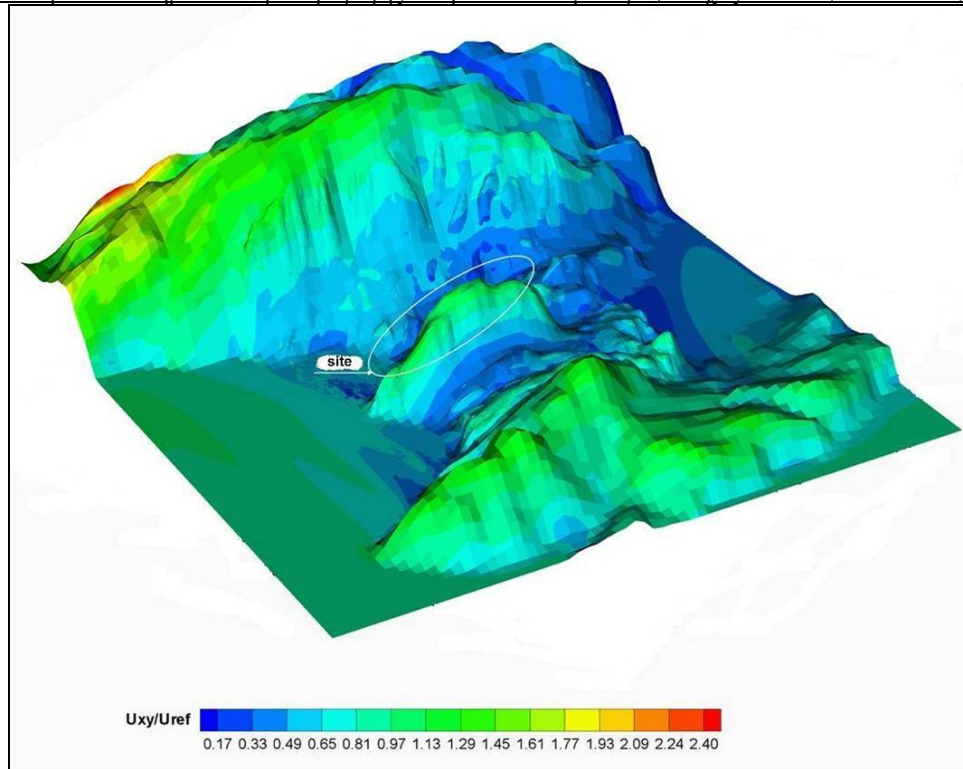
Σχήμα 2. Διάγραμμα διασυνδέσεων ελληνικού συστήματος με τα γειτονικά [ΔΕΣΜΗΕ, ΜΑΣΜ 2006]



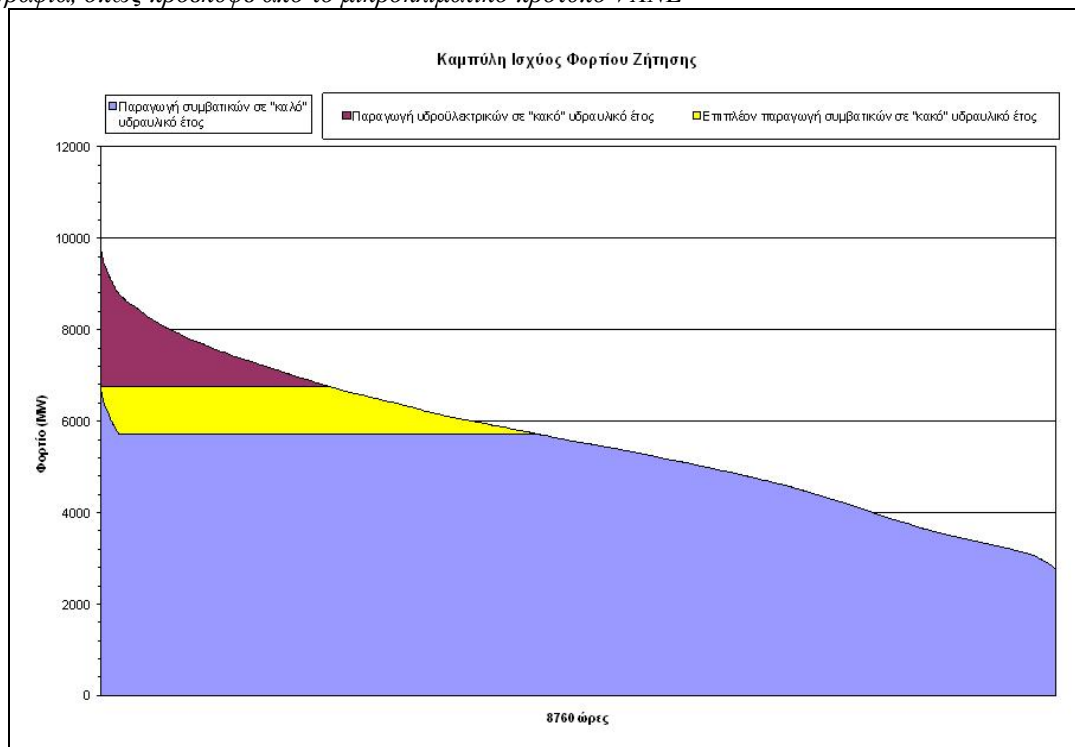
Σχήμα 3. Υπολογιστικό χωρίο του προτύπου COAMPS



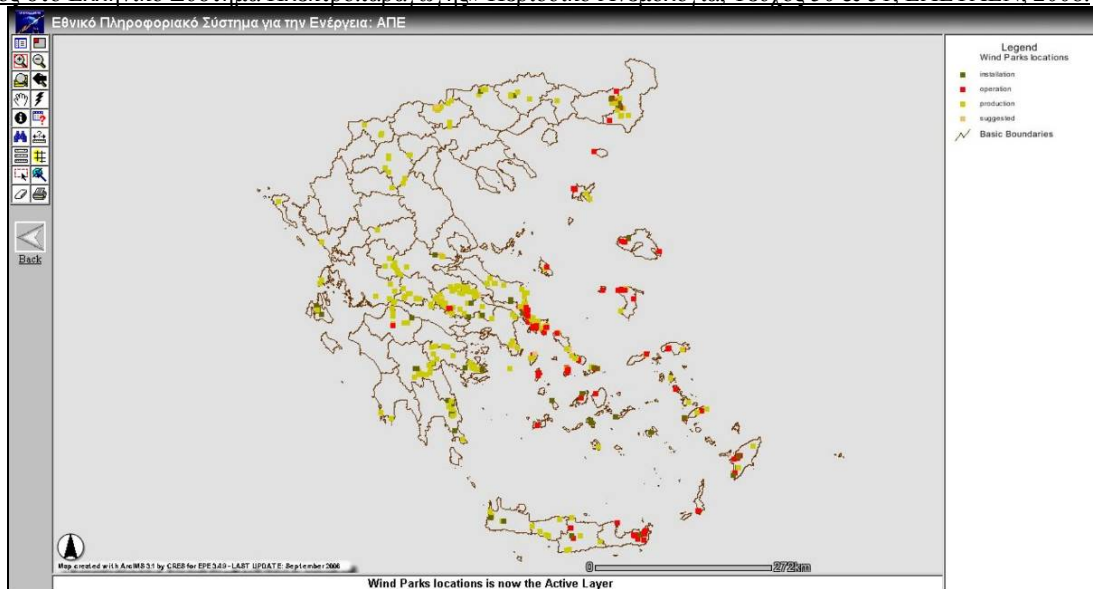
Σχήμα 4. Ενδεικτικός χάρτης MACH ανέμου μεσοκλίμακας (τελευταία εβδομάδα Απριλίου 2007)



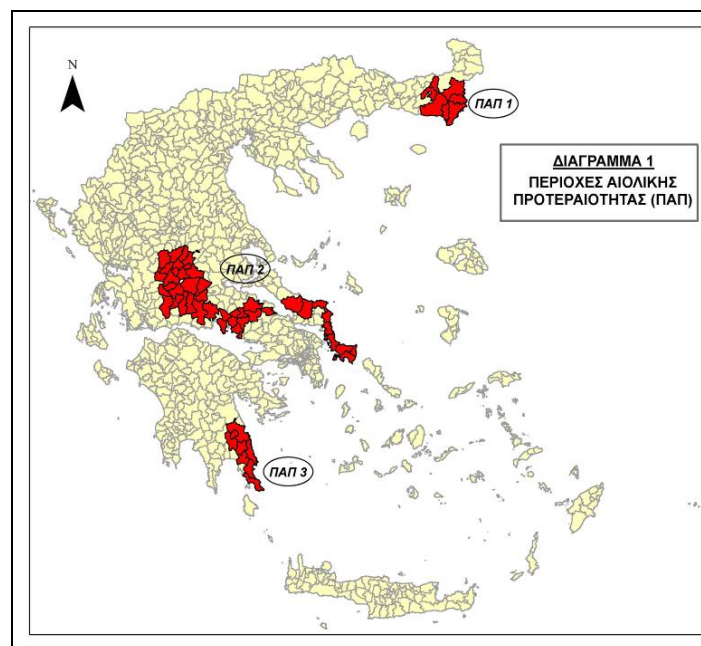
Σχήμα 5. Στις υποψηφίες περιοχές εγκατάστασης αιολικών πάρκων παρατηρείται επιτάχυνση του ανέμου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά σε ενδεικτική αναπαράσταση του πεδίου ανέμου πάνω από σύνθετη τοπογραφία, όπως προέκυψε από το μικροκλιματικό πρότυπο VANE



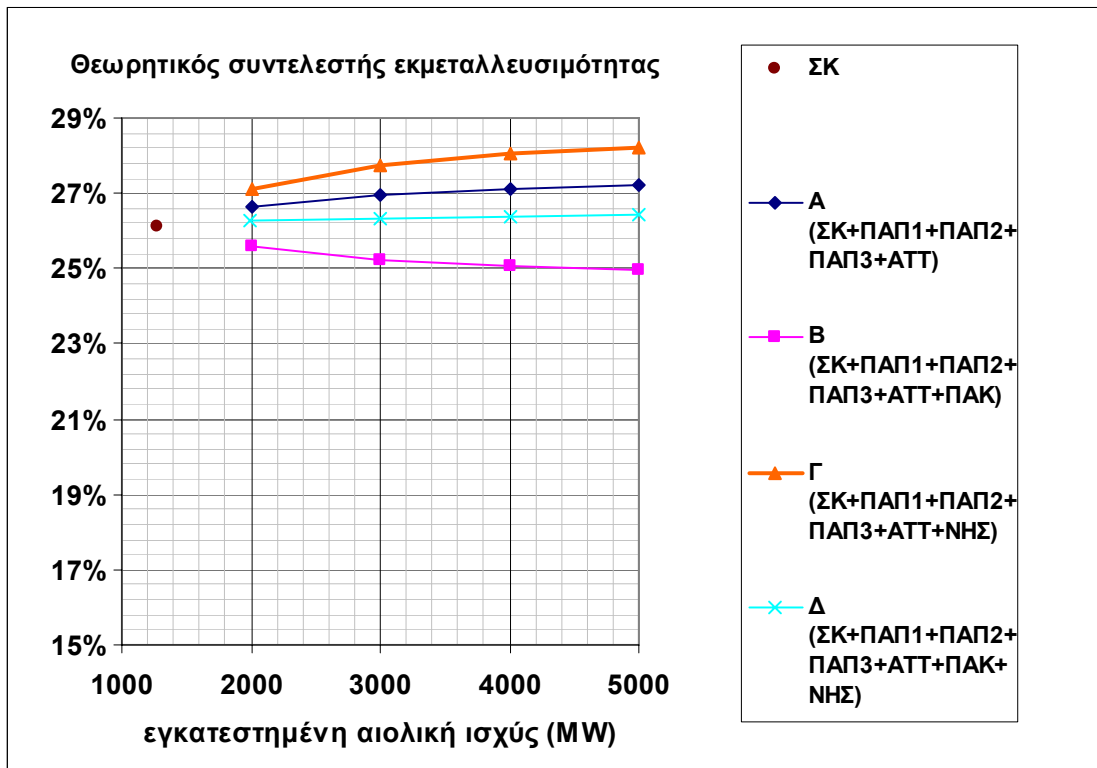
Σχήμα 6. Καμπύλη διάρκειας της ζήτησης και υδροηλεκτρική παραγωγή («καλό» και «κακό» έτος τα οποία αντιστοιχούν σε ετήσια ενδεικτική δυνατότητα παραγωγής των υδροηλεκτρικών μονάδων 5TWh και 2TWh αντίστοιχα)



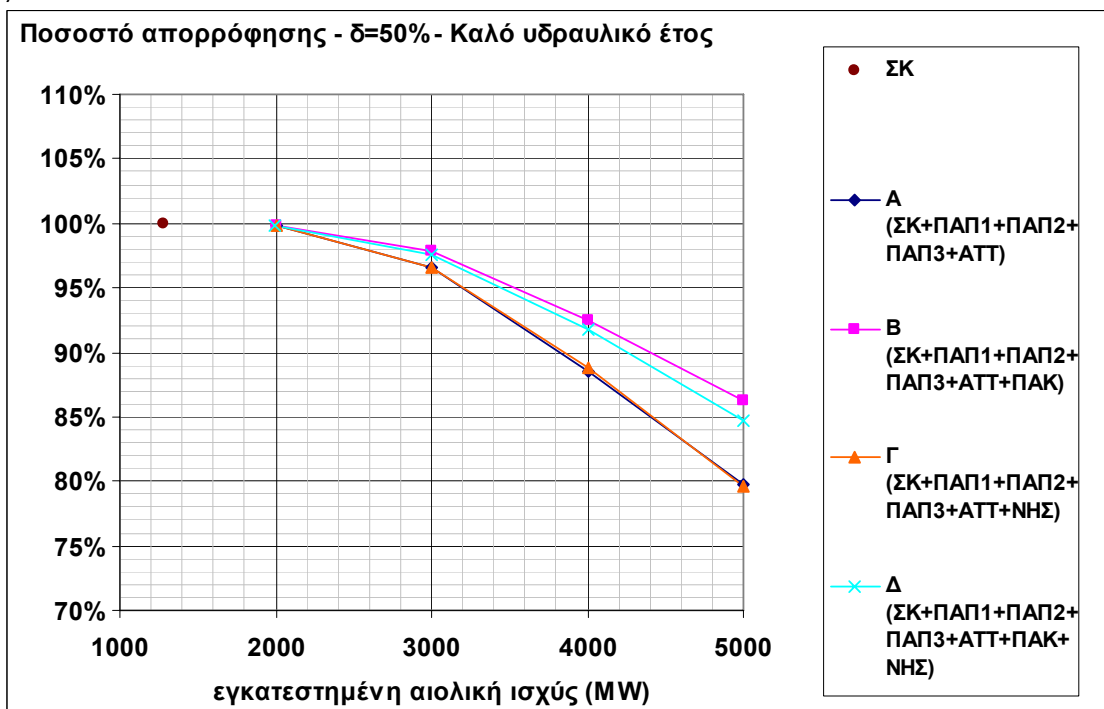
Σχήμα 7. Τρέχον καθεστώς σε σχέση με τα αιολικά πάρκα, όπως περιγράφεται σχηματικά στο Εθνικό Πληροφοριακό Σύστημα για την Ενέργεια του ΥΠΔΕ



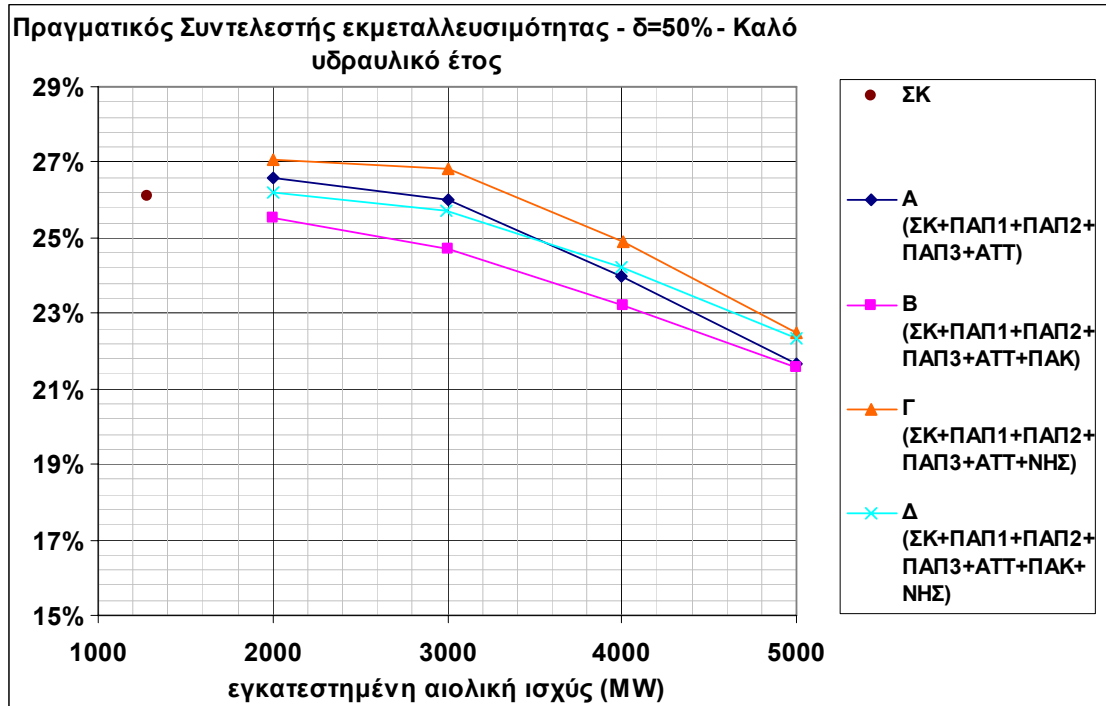
Σχήμα 8. Οι περιοχές αιολικής προτεραιότητας ΠΑΠ, όπως ορίζονται στο σχέδιο του ΕΧΠ για τις ΑΠΕ



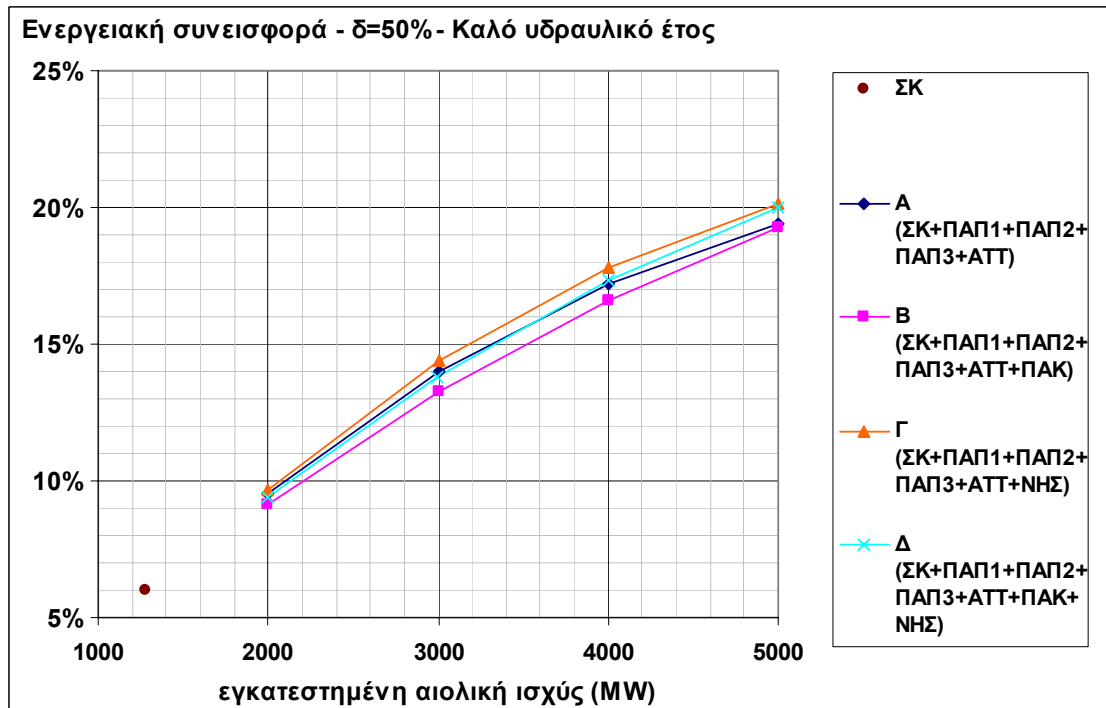
Σχήμα 9. Θεωρητικός συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας για εύρος διεύθυνσης αιολικών μέχρι 5000MW για τα σενάρια “Α”, “Β”, “Γ”, “Δ”



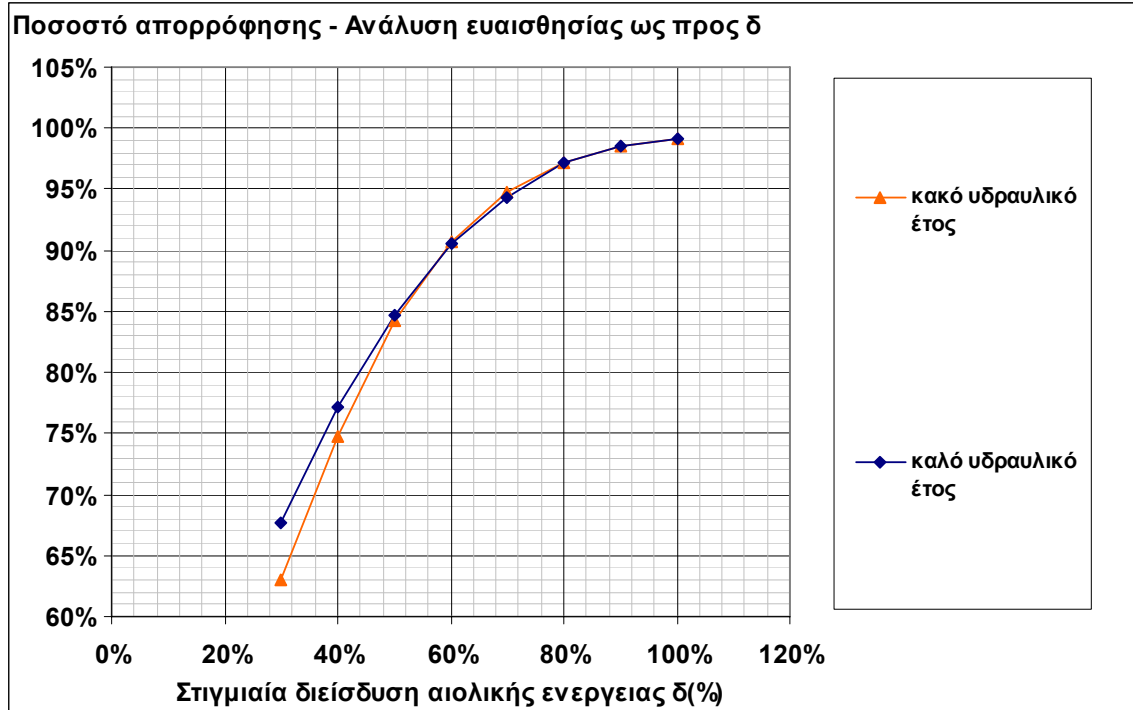
Σχήμα 10. Ποσοστό απορρόφησης αιολικής ισχύος για εύρος διεύθυνσης αιολικών μέχρι 5000MW σε «καλό» υδραυλικό έτος για τα σενάρια “Α”, “Β”, “Γ”, “Δ”



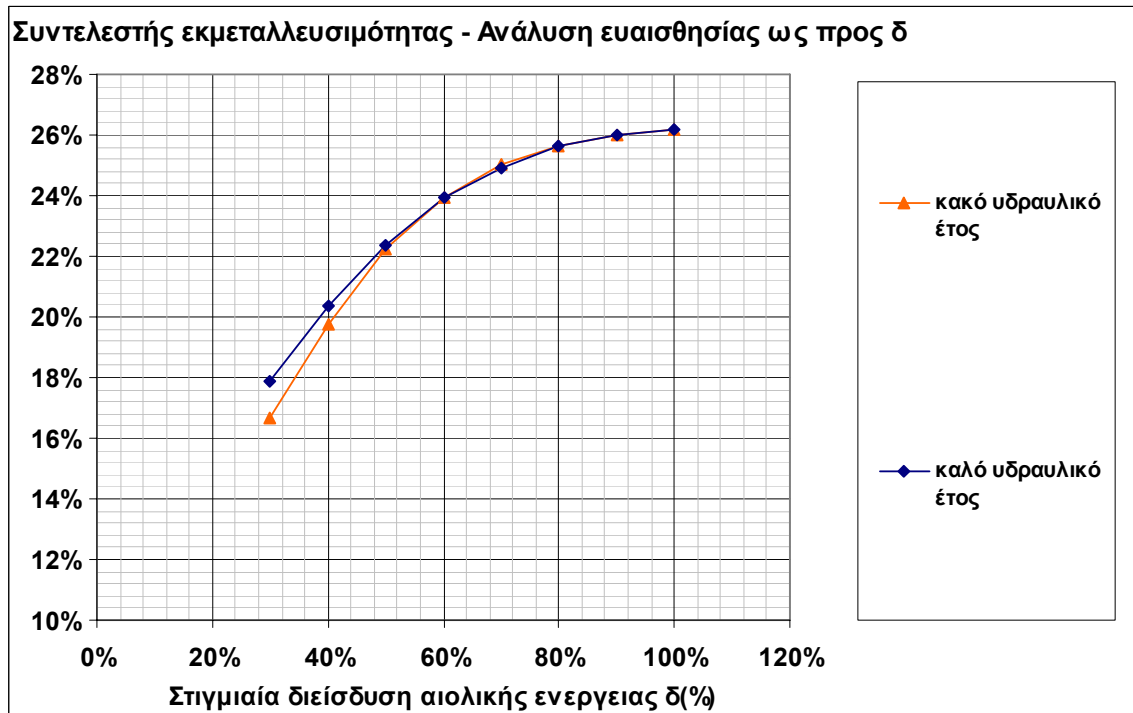
Σχήμα 11. Πραγματικός συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας αιολικών για εύρος διείσδυσης μέχρι 5000MW σε «καλό» υδραυλικό έτος για τα σενάρια “Α”, “Β”, “Γ”, “Δ”



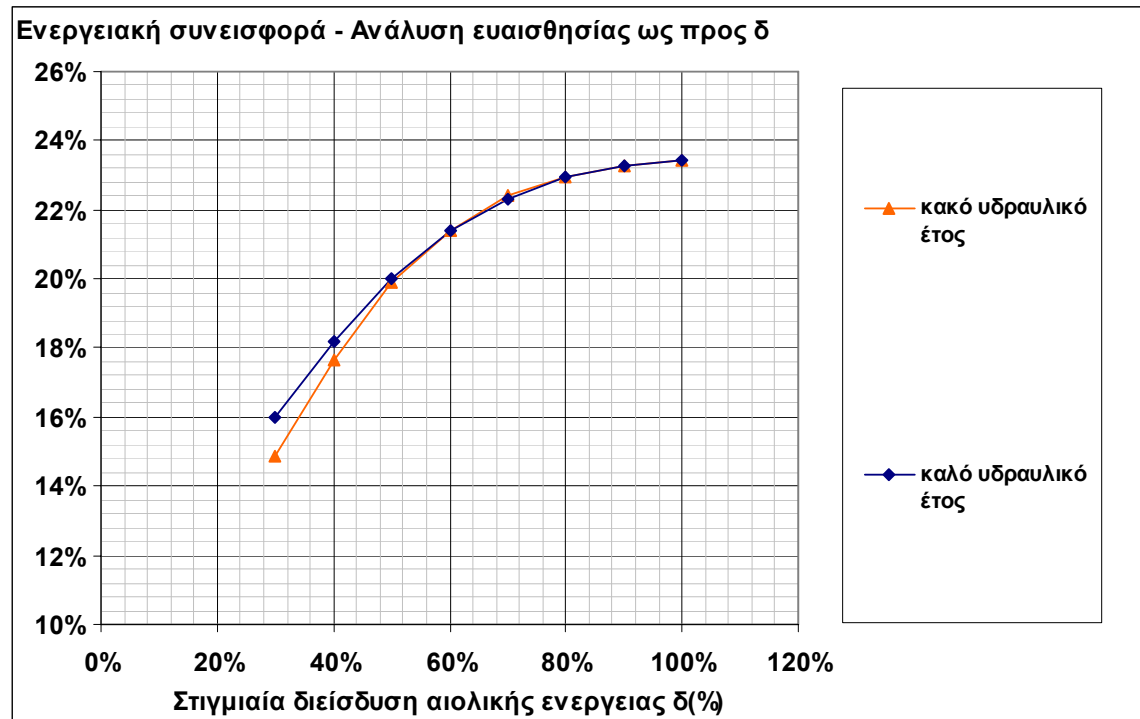
Σχήμα 12. Ενεργειακή συνεισφορά αιολικών για εύρος διείσδυσης μέχρι 5000MW σε «καλό» υδραυλικό έτος για τα σενάρια “Α”, “Β”, “Γ”, “Δ”



Σχήμα 13. Ανάλυση ευαισθησίας του ποσοστού απορρόφησης αιολικής ενέργειας ως προς την στιγμιαία διείσδυση των αιολικών



Σχήμα 14. Ανάλυση ευαισθησίας του πραγματικού συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας ως προς την στιγμιαία διείσδυση των αιολικών



Σχήμα 15. Ανάλυση ευαισθησίας του πραγματικού συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας ως προς την στιγμιαία διείσδυση των αιολικών

Πίνακες

		Εγκατεστημένη Αιολική ισχύς ανά περιοχή (MW)																							
Σενάριο	Σύνολο (GW)	Νομός Έβρου	Νομός Δράμας	Νομός Κιλκίς	Νομός Πέλλας	Νομός Φλώρινας	Νομός Καστοριάς	Νομός Ιωαννίνων	Νομός Λάρισσας - Πιερίας	Νομός Τρικάλων	Νομός Κεφαλλονιάς	Νομός Κέρκυρας	Νομός Αχαΐας	Νότια Εύβοια	Κεντρική - Νότια Εύβοια	Νομός Βοιωτίας	Νομός Ευρυτανίας	Σκύρος	Νομός Αττικής	Νομός Αργολίδας	Νομός Αρκαδίας - Λακωνίας	Νομός Χίου	Λέσβος	Λήμνος	Νάξος
ΣΚ	1.3	227	0	17	0	29	0	0	50	0	81	0	116	207	52	157	94	0	31	54	166	-	-	-	-
A2	2	287	60	17	0	29	0	0	50	24	81	0	116	352	196	229	191	0	43	54	272	0	0	0	0
A3	3	370	143	17	0	29	0	0	50	58	81	0	116	553	397	330	325	0	58	54	419	0	0	0	0
A4	4	453	226	17	0	29	0	0	50	91	81	0	116	754	599	430	459	0	74	54	567	0	0	0	0
A5	5	536	309	17	0	29	0	0	50	125	81	0	116	955	800	531	593	0	89	54	714	0	0	0	0
B2	2	257	30	35	18	65	54	54	104	12	117	36	170	279	124	193	142	0	37	54	219	0	0	0	0
B3	3	299	71	60	43	115	129	129	179	29	167	86	245	380	225	243	210	0	45	54	293	0	0	0	0
B4	4	340	113	85	68	165	204	204	254	46	217	136	320	481	325	294	277	0	53	54	367	0	0	0	0
B5	5	382	154	110	93	215	279	279	329	62	267	186	395	581	426	344	344	0	60	54	440	0	0	0	0
Γ2	2	257	30	17	0	29	0	0	50	12	81	0	116	279	124	193	142	72	37	54	219	72	72	72	72
Γ3	3	299	71	17	0	29	0	0	50	29	81	0	116	380	225	243	210	172	45	54	293	172	172	172	172
Γ4	4	340	113	17	0	29	0	0	50	46	81	0	116	481	325	294	277	272	53	54	367	272	272	272	272
Γ5	5	382	154	17	0	29	0	0	50	62	81	0	116	581	426	344	344	372	60	54	440	372	372	372	372
Δ2	2	247	20	29	12	53	36	36	86	8	105	24	152	256	101	181	127	47	35	54	202	47	47	47	47
Δ3	3	276	48	45	28	86	85	85	135	20	138	57	201	325	169	216	173	113	41	54	252	113	113	113	113
Δ4	4	304	77	62	45	119	135	135	185	31	171	90	251	393	238	250	218	179	46	54	303	179	179	179	179
Δ5	5	332	105	78	61	152	184	184	234	42	204	123	300	462	306	284	264	245	51	54	353	245	245	245	245

Πίνακας 1: Κατανομή εγκατεστημένης ισχύος στα διάφορα σενάρια

1ος Χαρακτήρας	
ΣΚ	Σημερινή Κατάσταση
A	ΣΚ+ΠΑΠ1+ΠΑΠ2+ΠΑΠ3+ΑΤΤ
B	ΣΚ+ΠΑΠ1+ΠΑΠ2+ΠΑΠ3+ΑΤΤ+ΠΑΚ
Γ	ΣΚ+ΠΑΠ1+ΠΑΠ2+ΠΑΠ3+ΑΤΤ+ΝΗΣ
Δ	ΣΚ+ΠΑΠ1+ΠΑΠ2+ΠΑΠ3+ΑΤΤ+ΠΑΚ+ΝΗΣ
2ος Χαρακτήρας	
2	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς 2000MW
3	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς 3000MW
4	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς 4000MW
5	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς 5000MW

Πίνακας 2: Ονοματολογία σεναρίων – Αντιστοίχιση με τα σχήματα και τον πίνακα 1