ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ EASY.

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΤΖΙΜΠΛΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΡΙΖΙΩΤΗΣ

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ:

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΤΟΜΕΑΣ:

ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατ’ αρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Βασίλη Ριζιώτη, που οποιαδήποτε στιγμή τον χρειάστηκα ήταν δίπλα μου με το γνώριμό του χαμόγελο και με όρεξη και υπομονή να λύσει την κάθε απορία μου και να μου παρέχει κάθε δυνατή βοήθεια. Η συμβολή του για μένα είναι πάρα πολύ σημαντική στην περάτωση της εργασίας μου, και με τις πολύτιμες και πολυάριθμες συμβουλές του κατάφερα να ξεπεράσω τις δυσκολίες που αντιμετώπισα και να υλοποιήσω τους στόχους μου.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ.Σπύρο Βουτσινά για το συνεχές του ενδιαφέρον για την πορεία της εργασίας μου και την προθυμία του απαντήσει στην οποιαδήποτε απορία μου.

Ευχαριστώ ξεχωριστά τον κ.Κυριάκο Γιαννάκογλου για την προθυμία του να μου επιτρέψει να χρησιμοποιήσω τον εξελικτικό αλγόριθμο EASY, που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών που συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στη δημιουργία της εργασίας μου, καθώς και τη Β.Ασούτη, που με τις οδηγίες της κατάφερα να κατανοήσω εις βάθος τη χρήση του EASY.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Παναγιώτη Σχοινά, που τόσες φορές τον σήκωσα, έστω και με το ζόρι από το γραφείο του, για οποιοδήποτε πρόβλημα αντιμετώπισα στη χρήση του υπολογιστή, καθώς και το Γιάννη Προσπαθόπουλο που με βοήθησε στο ξεκίνημα της εργασίας μου, όσον αφορά τη χρήση των απαιτούμενων προγραμμάτων στον υπολογιστή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπημένη μου Κυριακή Σκεύη, που είναι πάντα κοντά μου, και δε θα μπορούσα να ξεχάσω τους συμφοιτητές και φίλους Βασίλη Μιχαλόπουλο και Νίκο Μπεμπεδέλη, τόσο για τις άπειρες φορές που τους διέκοψα από την εργασία τους για να μου λύσουν απορίες στη χρήση του υπολογιστή, αλλά ακόμα περισσότερο για τις αμέτρητες στιγμές γέλοτος που μου προσέφεραν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1
Εισαγωγή.....σελ.2

Κεφάλαιο 2
Παρουσίαση μοντέλων ομόρρου.....σελ.5

Κεφάλαιο 3
Βελτιστοποίηση αιολικών πάρκων με χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου EASY..... σελ.10

3.α. Μεγιστοποίηση απόδοσης ενέργειας αιολικών πάρκων με μεταβλητές σχεδιασμού τις συντεταγμένες των ανεμογεννητριών σε:
3.α.1. Ορθογώνιο αιολικό πάρκο με το ρόδο ανέμου Α.....σελ.17
3.α.2. Ορθογώνιο αιολικό πάρκο με το ρόδο ανέμου Β.....σελ.60
3.α.3. Κυρτό πολυγωνικό πάρκο τυχαίου σχήματος με το ρόδο ανέμου Α.....σελ.102

3.β. Βελτιστοποίηση αιολικών πάρκων με μεταβλητές σχεδιασμού τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών
3.β.1. Μεγιστοποίηση απόδοσης αιολικού πάρκου.....σελ.114
3.β.2. Ελαχιστοποίηση τύρβης αιολικού πάρκου.....σελ.123

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση απόδοσης ενέργειας αιολικού πάρκου, καθώς και την ελαχιστοποίηση κόπωσης των μηχανών, με χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου EASY.

Αρχικά, επικεντρώνεται στη μεγιστοποίηση της απόδοσης ενέργειας αιολικών πάρκων συγκεκριμένου σχήματος (ορθογωνίου) και τυχαίου σχήματος, με μεταβλητές τις συντεταγμένες των ανεμογεννητριών.

Σε επόμενη φάση, στόχος είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης ενέργειας αιολικού πάρκου με μεταβλητά χαρακτηριστικά λειτουργίας.

Τέλος, επιχειρείται η ικανοποιητική απόδοση ενέργειας με ελαχιστοποίηση της κόπωσης των μηχανών (ελαχιστοποίηση τύρβης) με μεταβλητά χαρακτηριστικά λειτουργίας.

Abstract

This thesis aims to optimize wind farm energy efficiency and minimize fatigue machine, using the evolutionary algorithm EASY.

Initially focused on maximizing the energy efficiency of wind farms particular shape (rectangle) and random shapes with variable coordinates of wind turbines.

In the next phase, the objective is to maximize the energy yield of a wind park with variable operating characteristics.

Finally, attempts to satisfactory performance energy minimization of fatigue machines (minimizing turbulence) with variable operating characteristics.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Μία από της σπουδαιότερες ανάσες ζωής που έχει προσφέρει η ανθρωπότητα στον πλανήτη που την φιλοξενεί, είναι η χρήση των ΑΠΕ (Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) για την καταπολέμηση του ενεργειακού προβλήματος.

Οι ΑΠΕ είναι οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τέτοιες είναι:

- Η ηλιακή ενέργεια
- Η αιολική ενέργεια
- Η γεωθερμική ενέργεια
- Η ενέργεια κυμάτων
- Η παλιρροϊκή ενέργεια
- Η υδραυλική ενέργεια
- Τα εκλυόμενα αέρια από χώρους υγειονομικής ταφής και εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού
- Τα βιοαέρια

Η Έκθεση του Εθνικού Σχεδίου δράσης προβλέπει συμβολή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020. Η εκτίμηση αυτή εξειδικεύεται στη συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης, κυρίως για τον οικιακό τομέα αλλά και στη χρήση βιοκαυσίμων στις μεταφορές.

Σχ.1-1: Εθνικοί δεσμευτικοί στόχοι και εκτίμηση διείσδυσης ΑΠΕ

Ίσως τη σημαντικότερη μορφή ΑΠΕ αποτελεί η αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια, όπως και κάθε άλλη μορφή ενέργειας, έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Πλεονεκτήματα:

Απορρέοντας από τον άνεμο, η αιολική ενέργεια είναι μια καθαρή πηγή ενέργειας. Η αιολική ενέργεια δεν μολύνει την ατμόσφαιρα όπως τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού τα οποία στηρίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας ή το φυσικό αέριο. Οι ανεμογεννήτριες δεν εκλύουν χημικές ουσίες στο περιβάλλον οι οποίες προκαλούν όξινη βροχή ή αέρια του θερμοκηπίου.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες η αιολική ενέργεια είναι οικιακή πηγή ενέργειας, καθώς αφθονεί η διαθέσιμη πηγή, ο άνεμος. Η τεχνολογία που αναπτύσσεται περί την αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο οικονομικές που υπάρχουν σήμερα στον χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Κοστίζει ανάμεσα σε 4 και 6 cents ανά kWh· η τιμή εξαρτάται από την ύπαρξη ανέμου και από τη χρηματοδότηση ή μη του εκάστοτε προγράμματος παραγωγής αιολικής ενέργειας.
Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να στηθούν σε αγροκτήματα ή ράντσα, έτσι ωφελώντας την οικονομία των αγροτικών περιοχών, όπου βρίσκονται οι περισσότερες από τις καλύτερες τοποθεσίες από την άποψη του ανέμου. Οι αγρότες μπορούν να συνεχίσουν να εργάζονται στη γη, καθώς οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν μόνον ένα μικρό μέρος της γης. Οι ιδιοκτήτες των εγκαταστάσεων για την παραγωγή αιολικής ενέργειας πληρώνουν ενοίκιο στους αγρότες για τη χρήση της γης.

Μειονεκτήματα:

Η αιολική ενέργεια πρέπει να συναγωνιστεί τις συμβατικές πηγές ενέργειας σε επίπεδο κόστους. Ανάλογα με το πόσο ενεργητική, ως προς τον άνεμο, είναι μια τοποθεσία, το αιολικό πάρκο μπορεί ή δεν μπορεί να είναι ανταγωνιστικό ως προς το κόστος. Παρότι το κόστος της αιολικής ενέργειας έχει μειωθεί δραματικά τα τελευταία 10 χρόνια, η τεχνολογία απαιτεί μια αρχική επένδυση υψηλότερη από εκείνη των γεννητριών που λειτουργούν με καύση ορυκτών.

Η ισχυρότερη πρόκληση στη χρησιμοποίηση του ανέμου ως πηγή ενέργειας είναι ότι ο άνεμος είναι περιοδικά διακοπτόμενος και δεν φυσά πάντα όταν ο ηλεκτρισμός απαιτείται. Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί (εκτός αν χρησιμοποιηθούν μπαταρίες). Επιπλέον, δεν μπορούν όλοι οι άνεμοι να τιθασευτούν ώστε να καλυφθούν, τη στιγμή που προκύπτουν, οι ανάγκες σε ηλεκτρισμό.

Τα κατάλληλα σημεία για αιολικά πάρκα συχνά βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, μακριά από πόλεις όπου χρειάζεται ο ηλεκτρισμός. Η ανάπτυξη της εκμετάλλευσης του ανέμου ως φυσικού πόρου μπορεί ίσως να συναγωνιστεί άλλες χρήσεις της γης και αυτές οι εναλλακτικές χρήσεις ίσως χαίρουν μεγαλύτερης εκτιμήσεως απ΄ ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού. Αν και τα αιολικά πάρκα έχουν σχετικά μικρή επίπτωση στο περιβάλλον σε σύγκριση με άλλες συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, υπάρχει ένας προβληματισμός για τον θόρυβο που παράγεται από τα πτερύγια του ηλεκτρικού κινητήρα (ρότορα), για την αισθητική (οπτική) επίπτωση και για τα πουλιά που μερικές φορές έχουν σκοτωθεί καθώς πετούσαν προς τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα έχουν επιλυθεί ή έχουν σε σημαντικό βαθμό μειωθεί μέσω της τεχνολογικής ανάπτυξης ή μέσω της επιλογής κατάλληλων περιοχών για τη δημιουργία αιολικών πάρκων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση απόδοσης ισχύος και, κατ' επέκταση, παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες σε αιολικό πάρκο, με χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου EASY.

Σε πρώτο στάδιο, γίνεται βελτιστοποίηση συντεταγμένων των ανεμογεννητριών σε ορθογώνιο πάρκο και σε πάρκο τυχαίου κυρτού σχήματος , με χρήση του EASY, και στόχο τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας, όπου τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους είναι αμετάβλητα για κάθε ταχύτητα ανέμου. Σε επόμενο στάδιο, γίνεται βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών, για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, και συγκεκριμένες συντεταγμένες των ανεμογεννητριών, με χρήση του EASY, με στόχο επίσης τη βέλτιστη παραγωγή ενέργειας, σε πρώτη φάση, και την ελαχιστοποίηση ανάπτυξης τύρβης στο πάρκο, σε δεύτερη φάση, χωρίς όμως η παραγωγή ενέργειας να «πέσει» κάτω από κάποια όρια.

Ο EASY, είναι εξελικτικός αλγόριθμος και η λειτουργία του είναι η ελαχιστοποίηση μεγεθών. Το μέγεθος που ζητείται να ελαχιστοποιήσει ο EASY (cost function) είναι ουσιαστικά μία συνάρτηση, μία εξαρτημένη μεταβλητή, που εξαρτάται από άλλα μεγέθη (design variables), που είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές, τα οποία μπορεί να είναι 1,2, 100 ή και παραπάνω, τα οποία τοποθετούνται από τον χρήστη με κάποιο εύρος τιμών. Ελαχιστοποιεί, ουσιαστικά, μία συνάρτηση πολλών μεταβλητών. Ο EASY, έχει διάφορες επιλογές λειτουργίας. Σημαντικότερες επιλογές είναι το πόσες γενιές (generations) με λύσεις- αξιολογήσεις (evaluations) θα «τρέξει», αλλά και πόσες αξιολογήσεις θα έχει η κάθε γενιά. Η καλύτερη (μικρότερη ως νούμερο) αξιολόγηση της κάθε γενιάς, είναι πάντοτε ίδια ή καλύτερη από την καλύτερη της προηγούμενης. Βέβαια, αν πρέπει ή επιθυμείται να τεθούν όρια σε μεγέθη που εξαρτώνται από την επιλογή των design variables, τα όρια σε αυτά τα μεγέθη τοποθετούνται ως νούμερα στον πίνακα περιορισμών (constraints), όπου τα όρια είναι μέγιστα και όχι ελάχιστα όρια τιμών. Το «στήσιμο» του EASY εξηγείται για κάθε περίπτωση ξεχωριστά στο κεφάλαιο 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για να υλοποιηθεί ο στόχος της εργασίας, Πιο συγκεκριμένα, θα αναλυθούν τα μοντέλα ομόρρου Abramovich και GCL, καθώς και το μοντέλο αλληλεπίδρασης που υπολογίζει ταχύτητα ανέμου σε πολλαπλό ομόρρου.

Σύμφωνα με το μοντέλο Abramovich, ο ομόρρους χωρίζεται σε δύο περιοχές:

1. Την αρχική περιοχή με το δυναμικό πυρήνα κωνικού κωνικού σχήματος
2. Την κυρίως περιοχή, που αρχίζει με το τέλος του δυναμικού πυρήνα και τελειώνει περίπου 40 διαμέτρους μακριά από το δίσκο.

Σε όλους τους ακόλουθους τύπους, το μήκος είναι σε m και η ταχύτητα σε m/s.

Το μήκος X_C του πυρήνα δίνεται από τον τύπο:

$$X_C = R_T \cdot \frac{\frac{\sqrt{35}}{3} - 1}{\frac{DR}{DX}}$$

όπου R_T η ακτίνα του δίσκου (m) και DR/DX η κλίση του ομόρρου.

Η ακτίνα του δυναμικού πυρήνα δίνεται από τον παρακάτω τύπο σε m:

$$R_C(x) = R_T \cdot \frac{X_C - X}{X_C},$$

όπου $0 < X < X_c$.

Η ακτίνα του ομόρρου σε μήκος X από το δίσκο είναι σε m:

$$R(x) = R_T + \frac{DR}{DX} \cdot x$$

Η ταχύτητα u(m/s) του ανέμου στον ομόρρου δίνεται, ανάλογα με την ακτίνα r από την κεντρική γραμμή του ομόρρου και την απόσταση x από το δίσκο, από τους εξής τύπους, όπου U η αρχική ταχύτητα του ανέμου εκτός ομόρρου:

$u(x,r) = U,$ για $r > R(x)$.

$u(x,r) = V_T = U \cdot \sqrt{1 - Ct}$, για $0 < X < X_C$ και $0 < r < R_C(x)$, και Ct ο συντελεστής ώσης της μηχανής.

$u\ (x,r) = U - DU(x) \cdot [1 - \xi(x)^{1.5}]^{2}$, όπου $\xi(x) = \frac{r-R_C}{R_X-R_C}$ η παράμετρος αδιάστατης απόστασης και $DU(x) = U - V_T$ το έλλειμμα στην κεντρική γραμμή , για $0 < X < X_C$ και $R_C(x) < r < R(x)$.

$u\ (x,r) = U - DU(x) \cdot [1 - \xi(x)^{1.5}]^{2}$, όπου $\xi(x) = \frac{r}{R_X}$ η παράμετρος αδιάστατης απόστασης και $DU(x) = \frac{35}{9} \cdot (U - V_T) \cdot (\frac{R_T}{R_X})^2$ το έλλειμμα στην κεντρική γραμμή, για $X < X_C$ και $0 < r < R(x)$.

Η κλίση του ομόρρου DR/DX δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{DR(x)}{DX} = \sqrt{(\frac{DR}{DX})_m^{\ 2} + (\frac{DR}{DX})_\alpha^{\ 2}}$$

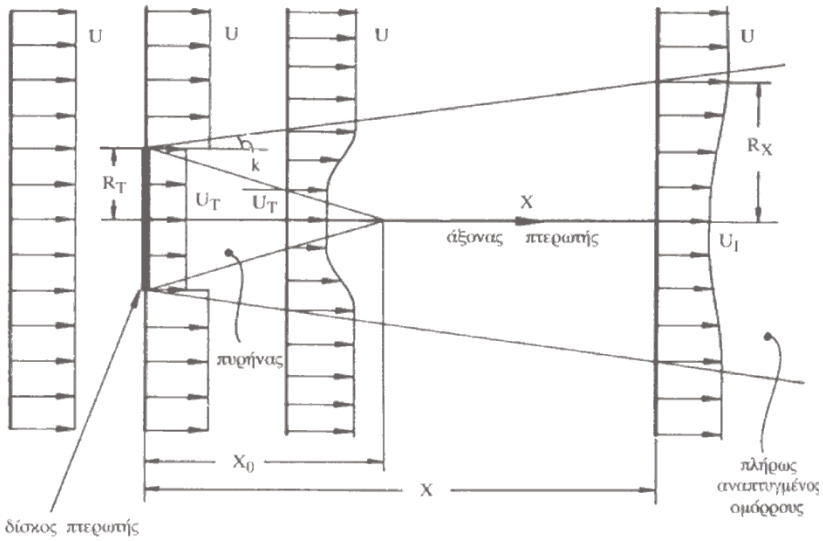
όπου $(DR/DX)_\alpha$ η τοπική τύρβη:

$$(\frac{DR}{DX})_\alpha = \frac{\alpha}{0.51}$$

όπου α=0.05 το ποσοστό της τύρβης στην ατμόσφαιρα και $(DR/DX)_m$ η διάχυτη τύρβη:

$$(\frac{DR}{DX})_m = \frac{0.22 \cdot (m-1)^2}{m^2 - 4 \cdot m + 1}$$

με $m = \frac{U}{V_T}$.



Σχ.2.1: Προφίλ ομόρρου Abramovich

Για επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Abramovich, κρίθηκε χρήσιμο να χρησιμοποιηθεί και το μοντέλο ομόρρου GCL, ούτως ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα του με τα αποτελέσματα του Abramovich. Παρατίθενται, λοιπόν, παρακάτω, οι τύποι υπολογισμού ταχύτητας ανέμου μέσα σε ομόρρου για το πρότυπο GCL.

$R_{nb} = \max\{ 1.08 \cdot D, 1.08 \cdot D + 21.7 \cdot (I_\alpha - 0.05) \}$, όπου I_α το ποσοστό τύρβης στην ατμόσφαιρα $I_\alpha = 0.05$.

$R_{9.5} = 0.5 \cdot (R_{nb} + \min\{ Z_{hub} , R_{nb} \})$, όπου $Z_{hub} = 90m$

Η ακτίνα, λοιπόν, του ομόρρου δίνεται από τον παρακάτω τύπο σε m:

$R(x) = 0.5 \cdot D \cdot (1 + \frac{Ct \cdot x}{X_0})^{1/3}$, όπου $X_0 = \frac{9.5 \cdot D}{(\frac{2 \cdot R_{9.5}}{D})^3 - 1}$ και x η απόσταση από το δίσκο, D η διάμετρος του δίσκου και Ct ο συντελεστής ώσης της μηχανής.

Η κλίση του ομόρρου είναι:

$$\frac{DR(x)}{DX} = 20.979 \cdot \frac{Ct}{X_0} \cdot (1 + \frac{Ct \cdot x}{X_0})^{-2/3}$$

Στο μοντέλο GCL, δεν υπάρχει δυναμικός πυρήνας. Έτσι, το έλλειμα ταχύτητας σε όλο το μήκος της κεντρικής γραμμής του ομόρρου, δίνεται, σε m/s, από τον τύπο:

$DU(x) = \frac{35}{72} \cdot U \cdot (\frac{R_T}{R(x)})^2 \cdot Ct$, όπου U η ταχύτητα του ανέμου εκτός ομόρρου.

Ως εκ τούτου, η ταχύτητα του ανέμου σε σημείο που απέχει ακτίνα r από την κεντρική γραμμή του ομόρρου και απόσταση x από το δίσκο, είναι:

$u(x,r) = U - DU(x) \cdot [1 - \xi(x)^{1.5}]^2$, όπου $\xi(x) = \frac{r}{R_X}$ η αδιάστατη παράμετρος απόστασης.

Αυτές, λοιπόν, είναι οι σχέσεις, και για τα δύο μοντέλα ομόρρου, που δίνουν την ταχύτητα του ανέμου σε κάθε σημείο μέσα στον ομόρρου.

Στο υποκεφάλαιο 3.β.2 της εργασίας, στόχος είναι όχι η μέγιστη παραγωγή ενέργειας, αλλά η ελαχιστοποίηση της τύρβης. Για το λόγο αυτό, απαραίτητο κρίθηκε να προστεθούν στον κώδικα και οι σχέσεις υπολογισμού της τύρβης μέσα στον ομόρρου. Το μοντέλο Abramovich δεν εμπεριέχει σχέσεις για τύρβη, σε αντίθεση με το GCL, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό. Παρακάτω, λοιπόν, ακολουθούν οι σχέσεις υπολογισμού τύρβης του μοντέλου GCL.

Στο πρότυπο αυτό, η τύρβη έχει δύο συνιστώσες:

1. Την ατμοσφαιρική τύρβη $I_\alpha = 0.05$
2. Την τύρβη λόγω ομόρρου I_w που δίνεται από τον τύπο:

$$I_w = 0.29 \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{-1/3} \cdot \sqrt{1-\sqrt{1-Ct}}$$

όπου x η απόσταση από το δίσκο σε m, D η διάμετρος του δίσκου σε m και Ct ο συντελεστής ώσης της μηχανής.

Άρα, η συνολική τύρβη δίνεται από τον τύπο:

$$I = \sqrt{I_\alpha^2 + I_w^2}$$

Στους παραπάνω τύπους που αφορούν την τύρβη, όλα τα μεγέθη της τύρβης είναι σε ποσοστά. Επειδή, όμως, αναφερόμαστε σε ταχύτητα τύρβης, σωστό είναι να πολλάπλασιαστεί με την εκάστοτε ταχύτητα ανέμου. Άρα, ο παραπάνω τύπος για τη συνολική ταχύτητα τύρβης γράφεται:

$$I = \sqrt{(I_\alpha^2 + I_w^2)} \cdot V$$

όπου, πλέον το I είναι σε μονάδες ταχύτητας (m/s).

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας και τύρβης μέσα στον ομόρρου που δημιουργείται από μία μηχανή, αρκούν οι σχέσεις του Abramovich ή του GCL για την ταχύτητα και οι σχέσεις του GCL για την τύρβη. Ωστόσο, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις σε πραγματικά αιολικά πάρκα, αλλά και στα πάρκα που θα μελετηθούν στη συνέχεια της εργασίας, ο ομόρρους που δέχεται μία μηχανή δεν είναι μόνο μίας ανεμογεννήτριας, αλλά δύο ή και περισσοτέρων. Για τον υπολογισμό, λοιπόν, της ταχύτητας και της τύρβης που δέχεται αυτή η ανεμογεννήτρια, απαραίτητη είναι η χρήση του μοντέλου αλληλεπίδρασης.

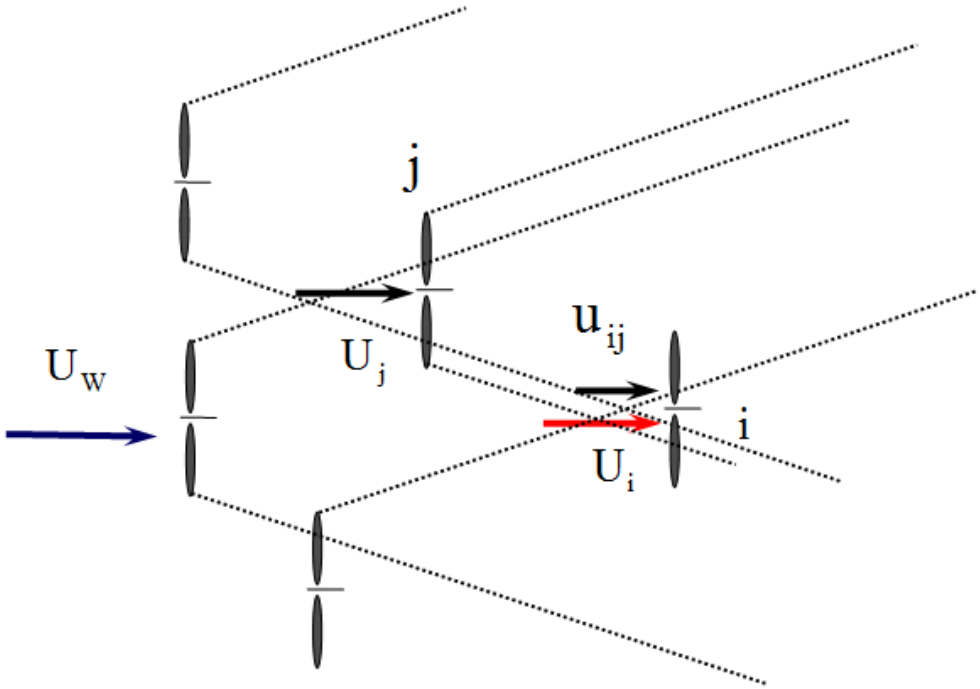
Θεωρώντας ότι οι μηχανές j που δέχονται ταχύτητα U_j επάγουν σε μία μηχανή i, και, προφανώς, κάποια ή κάποιες από τις j, θα δέχεται την αδιατάραχτη ταχύτητα U του πάρκου, σύμφωνα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, η ταχύτητα U_i που δέχεται η i δίνεται από τον τύπο:

$$(U - U_i)^2 = \left[\sum_{j=1}^{N} (U_J - u_{ij})^2\right]$$

Όπου N ο αριθμός των μηχανών j η ταχύτητα u_{ij} είναι η ταχύτητα ανέμου που θα δεχόταν η μηχανή i από την κάθε μία j μεμονομένα, σα να μην υπάρχουν οι άλλες j.

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η ταχύτητα τύρβης σε μία μηχανή που δέχεται πολλαπλό ομόρρου.

Έτσι, με το μοντέλο αλληλεπίδρασης ολοκληρώθηκε η περιγραφή όλων των μοντέλων ταχύτητας και τύρβης σε ομόρρου, για κάθε περίπτωση.



Σχ.2.2: Μοντέλο αλληλεπίδρασης ομόρρου

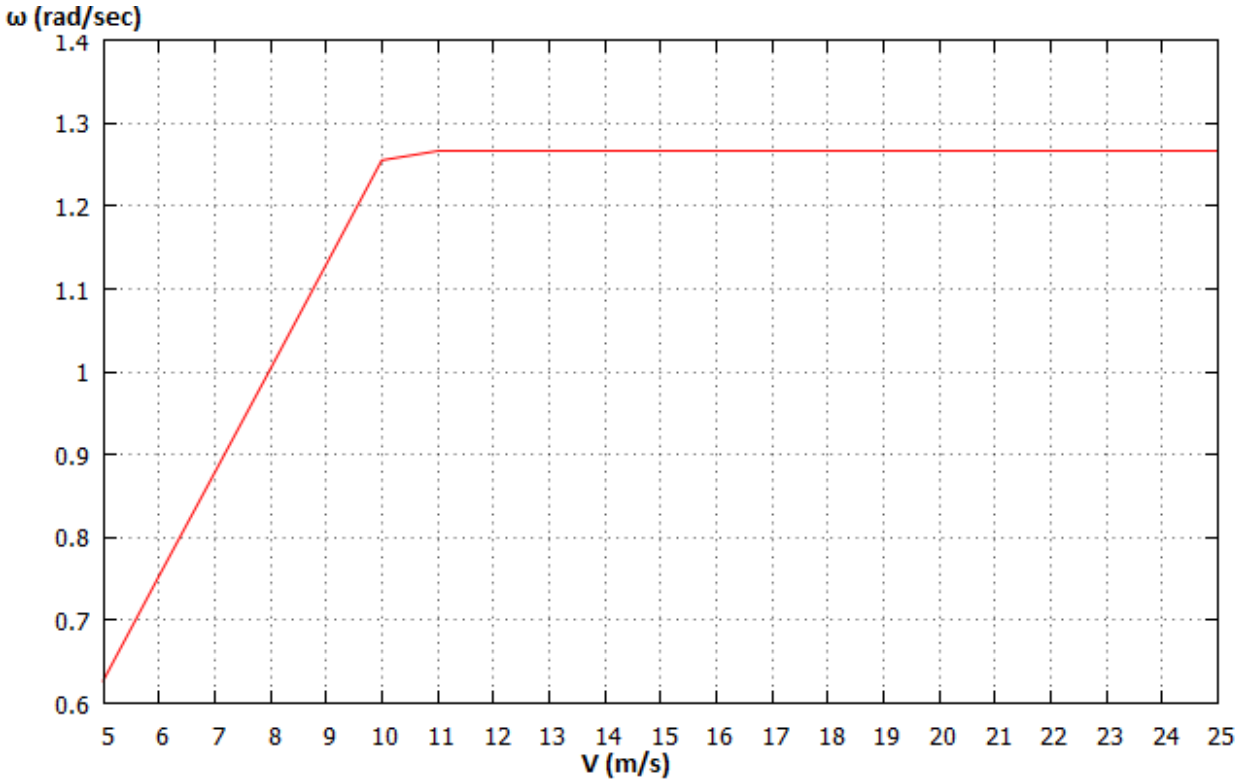
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Στο κεφάλαιο αυτό, θα περιγραφούν αναλυτικά όλες οι διαδικασίες για τις περιπτώσεις αιολικών πάρκων που μελετήθηκαν στην εργασία, και επιπλέον θα αναγραφούν και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα στα οποία, σε κάθε περίπτωση, κατέληξε ο EASY.

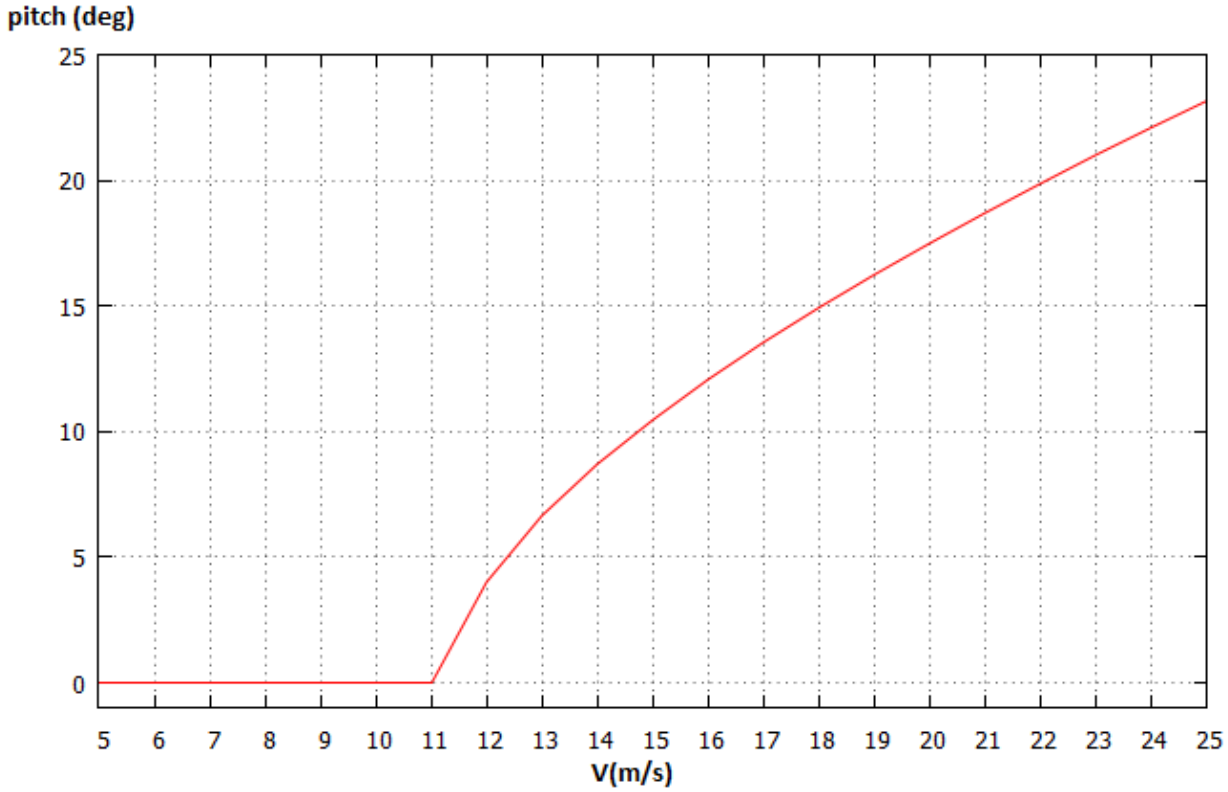
Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται είναι τρίπτερες, οριζοντίου άξονα, ακτίνας 63m και ονομαστικής ισχύος P_R = 5 MW. Η ταχύτητα ανέμου στην οποία ξεκινούν να παράγουν ισχύ είναι η $V_{cut\text{-}in}$=5m/s και η ταχύτητα ανέμου πάνω από την οποία παύουν να λειτουργούν είναι η $V_{cut\text{-}out}$=25m/s.

Στα πρώτα τρία υποκεφάλαια 3.α.1, 3.α.2 και 3.α.3, που θα αναλυθούν παρακάτω, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται μόνο στη τοποθέτηση των ανεμογεννητριών με τρόπο τέτοιο, ώστε, με βάση ένα συγκεκριμένο ρόδο ανέμου, να έχουν ελάχιστες αλληλεπίδρασεις ομόρρου (wake effects), κυρίως, φυσικά, στις διευθύνσεις ανέμου με τις μεγαλύτερες συχνότητες. Η ισχύς που παράγεται από την κάθε μηχανή εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την ταχύτητα ανέμου που αυτή δέχεται, επομένως η παραγόμενη ισχύς επηρεάζεται μονοδιάστατα από την επίδραση ομόρρου σε μία μηχανή, και το έλλειμα ισχύος επηρεάζεται αποκλειστικά και μόνο από το έλλειμα ταχύτητας σε σχέση με την αδιατάραχτη ταχύτητα ανέμου του πάρκου. Σε αυτά τα δύο υποκεφάλαιο, λοιπόν, δεν υπάρχει μεταβολή των χαρακτηριστικών λειτουργίας των μηχανών για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ώστε να ρυθμιστεί η ισχύς που θα παράγουν, αφού οι γωνίες βήματος pitch και η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ω (rad/sec) επιλέγονται μέσω της καμπύλης pitch - ω από τον κώδικα, και είναι στάνταρ για κάθε ταχύτητα ανέμου. Μετά από επιλογή του βήματος και του ω, με χρήση της υπορουτίνας RAFT, που υπολογίζει την απόδοση δρομέα με τη χρήση της μεθόδου στοιχείων πτερύγωσης, γίνεται υπολογισμός της ισχύος και του συντελεστή ώσης Ct της μηχανής. Η καμπύλη pitch – ω δίνει τιμές για ακέραιες ταχύτητες ανέμου. Για ενδιάμεσες ταχύτητες ανέμου, ο υπολογισμός βήματος και ω γίνεται με χρήση υπορουτίνας γραμμικής παρεμβολής. Ένας επόμενος τρόπος υπολογισμού ισχύος και Ct, είναι απευθείας μέσω της καμπύλης POWER – Ct. Κρίθηκε πιο βολικό να χρησιμοποιηθεί αυτός ο τρόπος υπολογισμού, μόνο και μόνο χάρην συντομίας, καθότι έτσι δεν χρειάζεται να γίνει υπολογισμός στη RAFT, η οποία και απενεργοποιείται, με αποτέλεσμα πολύ μεγάλη εξοικονόμηση χρόνου. Όμοια και η καμπύλη POWER – Ct για ακέραιες ταχύτητες ανέμου, και για τις ενδιάμεσες χρησιμοποιείται η υπορουτίνα γραμμικής παρεμβολής.

Παρακάτω παρατίθενται οι καμπύλες pitch – V και ω – V της μηχανής:



Σχ.3.1: Απεικόνιση καμπύλης ω - V



Σχ.3.2: Απεικόνιση καμπύλης γωνία βήματος - V

Η γωνιακή ταχύτητα ω του δρομέα έχει ω_{min} = 0.627 rad/sec στην ταχύτητα $V_{cut\text{-}in}$=5m/s και αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα ανέμου έως ότου φτάσει το ανώτατο όριο ω_{max} = 1.267 rad/sec σε ταχύτητα ανέμου 11m/s, στο οποίο και παραμένει μέχρι και την ταχύτητα ανέμου $V_{cut\text{-}out}$=25m/s.

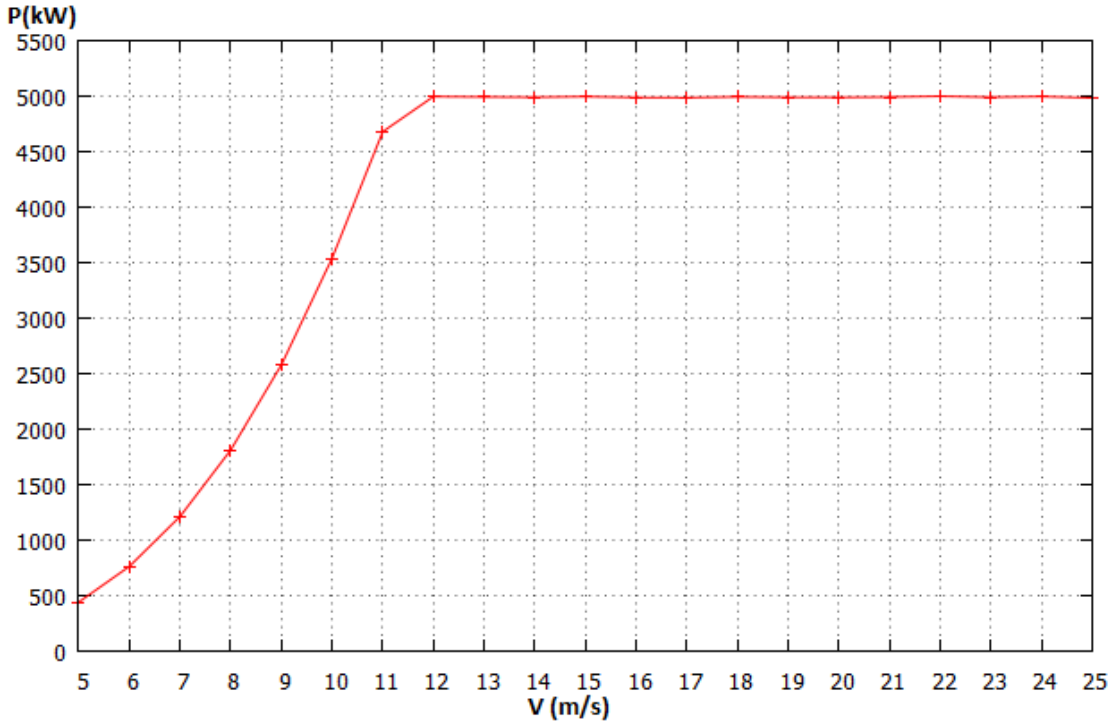
Όσον αφορά τις γωνίες βήματος, αυτές είναι 0° μέχρι τα 11m/s, όπου και αρχίζει σιγά σιγά να αυξάνεται, καθώς η ισχύς έχει φτάσει κοντά στην ονομαστική και με τη συνεχή αύξηση του βήματος, η ισχύς διατηρείται στην ονομαστική της τιμή μέχρι τη $V_{cut\text{-}out}$.

Παρακάτω, επειδή, τελικά, χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη POWER – Ct, κρίθηκε σωστό να αναγραφούν οι ακριβείς της τιμές για κάθε, τιμές στις οποίες, ουσιαστικά, καταλήγουν και οι υπολογισμοί ισχύος και Ct μέσα στην υπορουτίνα RAFT από τις αντίστοιχες γωνίες βήματος και ω των παραπάνω καμπυλών για την κάθε ταχύτητα ανέμου:

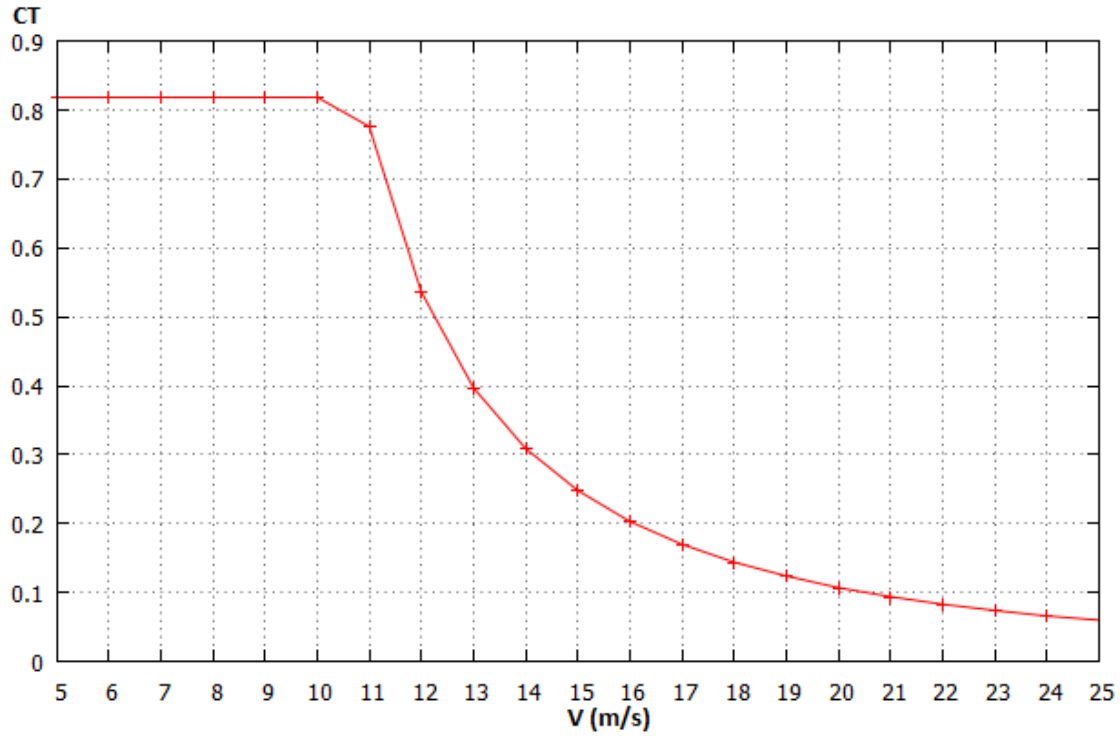
V(m/s)	POWER(kW)	Ct
0.50	0.00	0.819
1.00	0.00	0.819
4.9999999	0.00	0.819
5.00	442.57	0.819
6.00	764.76	0.819
7.00	1214.40	0.819
8.00	1812.75	0.819
9.00	2581.05	0.819
10.00	3540.54	0.819
11.00	4680.41	0.776
12.00	4996.86	0.536
13.00	4993.80	0.397
14.00	4991.20	0.309
15.00	4997.12	0.248
16.00	4988.50	0.203
17.00	4987.48	0.170
18.00	4994.53	0.144
19.00	4990.37	0.124
20.00	4989.62	0.107
21.00	4993.04	0.094
22.00	5000.01	0.083
23.00	4991.30	0.074
24.00	4997.85	0.066
25.00	4984.67	0.060

Πίν.3.1: Καμπύλη POWER - Ct

Εδώ παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες καμπύλες POWER – V και Ct – V:



Σχ.3.3: Απεικόνιση καμπύλης P – V.



Σχ.3.4: Απεικόνιση καμπύλης Ct - V

Στην καμπύλη POWER – Ct, παρά το γεγονός ότι η μηχανή δε λειτουργεί σε ταχύτητα ανέμου μικρότερη από 5m/s, αναγράφονται και τιμές ταχύτητας μικρότερες από αυτήν. Αυτό είναι απαραίτητο για σωστό υπολογισμό αποτελεσμάτων, καθότι στις καμπύλες ισχύος που θα απεικονιστούν σε διάφορα στάδια της εργασίας, η ταχύτητα στον οριζόντιο άξονα είναι η ταχύτητα ανέμου στο πάρκο. Η μηχανή, όμως, δέχεται αυτή την ταχύτητα μόνο αν δεν επιδρά πάνω της ομόρρους. Αν υπάρχει, όμως, επίδραση ομόρρου, η ταχύτητα που δέχεται είναι μικρότερη, και αν είναι κάτω των 5m/s, ο κώδικας πρέπει να υπολογίσει μηδενική ισχύ. Αρα, για ταχύτητες μικρότερες των 5m/s, πρέπει να γραφεί στην POWER – Ct , ότι η αποδιδόμενη ισχύς είναι 0, σε δύο τουλάχιστον σημεία, ώστε να γίνεται γραμμική παρεμβολή και να μηδενίζει και την ισχύ των ενδιαμέσων τους ταχυτήτων. Σημαντικό είναι η μεγαλύτερη τιμή από αυτές να είναι ελάχιστα μικρότερη των 5m/s, όπως είναι το 4.9999999 m/s, ώστε να μην γίνεται γραμμική παρεμβολή με τη μη μηδενική τιμή ισχύος για 5m/s και παράγεται ισχύς σε μικρότερη ταχύτητα ανέμου. Το Ct, στις μικρότερες ταχύτητες παραμένει ίδιο, καθότι έτσι γίνεται σωστός υπολογισμός στα μοντέλα ομόρρου.

Από τις παραπάνω καμπύλες, φαίνεται ότι η παραγωγή ισχύος μίας μηχανής εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα ανέμου που αυτή δέχεται, επομένως, και από το πόσο έντονη επίδραση ομόρρου έχει από μία ή περισσότερες μηχανές.

Πολύ μεγάλη σπουδαιότητα για την αποδοτική λειτουργία ενός αιολικού πάρκου έχει το ρόδο ανέμου. Τα ρόδα ανέμου, όπως είναι προφανές, ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή.

Τα ρόδα ανέμου που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω, χωρίζονται σε 16 διευθύνσεις με ίσες γωνίες 360° / 16 = 22.5^{o} μεταξύ τους, και άρα, οι μηχανές στρέφονται σε 16 διαφορετικές διευθύνσεις. Θα ήταν ιδιαίτερα επιθυμητή η επιτυχία ελάχιστης ή και μηδενικής επίδρασης ομόρρου για όλες τις διευθύνσεις ανέμου, κάτι το οποίο όμως είναι αδύνατο, καθότι με απλή λογική, σε τουλάχιστον 2 διευθύνσεις (που θα έχουν διαφορά 180 μοιρών), μέσα στις 360 μοίρες της γωνίας περιστροφής των ανεμογεννητριών, οι μηχανές θα βρίσκονται η μία πίσω από την άλλη, με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση ομόρρου μεταξύ τους. Το τελευταίο φυσικά ποικίλει, ανάλογα με τον αριθμό των ανεμογεννητριών και τις διαστάσεις του χωραφιού. Για παράδειγμα, εάν υποτεθεί η ιδανική περίπτωση ενός πάρκου με μικρό αριθμό μηχανών, έστω 5, ένα χωράφι μεγάλων διαστάσεων, έστω 4 επί 4km, και ένα ρόδο ανέμου στο οποίο οι διευθύνσεις των μικρότερων συχνοτήτων ανέμου έχουν διαφορά 180 μοιρών, όπως και των μεγαλυτέρων, οι μηχανές θα τοποθετούνταν με τρόπο ώστε να βρίσκονται η μία πίσω από την άλλη στις 2 διέυθυνσεις ελαχίστων συχνοτήτων, και λόγω των μεγάλων αποστάσεων, η αλληλεπίδραση θα ήταν ανεπαίσθητη.

Ένα ρόδο ανέμου με εμφανείς την κύρια διεύθυνση, δηλαδή τη διεύθυνση υψηλής συχνότητας ανέμου, και τη διεύθυνση χαμηλής συχνότητας ανέμου, είναι συμφέρον για επίτευξη υψηλής παραγωγής ενέργειας, καθότι επιτρέπει να επιλεγούν συντεταγμένες

μηχανών με χαμηλή, έως και μηδενική επίδραση ομόρρου στην κύρια διεύθυνση. Ωστόσο, μεγάλο ενδιαφέρον έχει και η «χρήση» ενός ρόδου ανέμου στο οποίο οι κύριες διευθύνσεις είναι πολλές, με παραπλήσιες συχνότητες, που κάνουν εξαιρετικά δύσκολη την εύρεση βέλτιστων συντεταγμένων για μέγιστη παραγωγή ισχύος. Θα γίνει, λοιπόν, βελτιστοποίηση των συντεταγμένων ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου και με τους δύο τύπους ρόδων ανέμου.

Γενικά, το ΑΕΠ, που είναι η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας σε ένα αιολικό πάρκο, και η μεγιστοποίησή του θα απασχολήσει σε όλα σχεδόν τα πάρκα σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφεται από τον τύπο:

$$\text{ΑΕΠ} = P\cdot 8760 \ \ (\text{kWh})$$

όπου 8760 οι ώρες (h) του έτους και $P = \frac{Cp\cdot\frac{\rho}{2}\cdot V^3 \ \cdot A\cdot 0.94}{1000}$ η ισχύς της ανεμογενήτριας σε kW.

Επίσης για την ισχύ, ρ=1.225kg/m^3 η πυκνότητα ανέμου, V (m/s) η ταχύτητα ανέμου που δέχεται η μηχανή, $A=\pi\cdot R^2$ = 12462.66m^2 το εμβαδόν του δίσκου της ανεμογεννήτριας, 0.94 ο συντελεστής ηλεκτρικής ισχύος της ανεμογεννήτριας, Cp ο συντελεστής ισχύος του δρομέα.

Στην παρούσα περίπτωση, θα γίνει μεγιστοποίηση του ΑΕΠ για όλες τις διευθύνσεις (16), ταχύτητες ανέμου (21) και μηχανές (T), άρα το ΑΕΠ δίνεται από τον τύπο:

$$AE\Pi = \sum_{n=1}^{16}\sum_{m=1}^{21}\sum_{k=1}^{T} P\cdot\frac{f(n,m)}{100}\cdot 8760$$

όπου f(n,m) η συχνότητα % του ρόδου ανέμου για κάθε διεύθυνση και ταχύτητα.

Βέβαια, το ΑΕΠ δε δείχνει το πόσο αποδοτικό είναι ένα πάρκο, καθότι, αν για παράδειγμα έχουμε ένα τεράστιο πάρκο 100 ανεμογεννητριών, όπου όμως όλες υπολειτουργούν, αποδίδοντας μικρό ποσό ισχύος, το ΑΕΠ θα είναι αρκετά μεγάλο, καθότι συμπεριλαμβάνει στον υπολογισμό του τον αριθμό των ανεμογεννητριών. Το CF (Capacity Factor), είναι ένας συντελεστης ανεξάρτητος του αριθμού των μηχανών, και δείχνει πόσο, πραγματικά, αποδοτικό είναι ένα αιολικό πάρκο. Περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$CF = \frac{AE\Pi}{8760\cdot T\cdot PR}$$

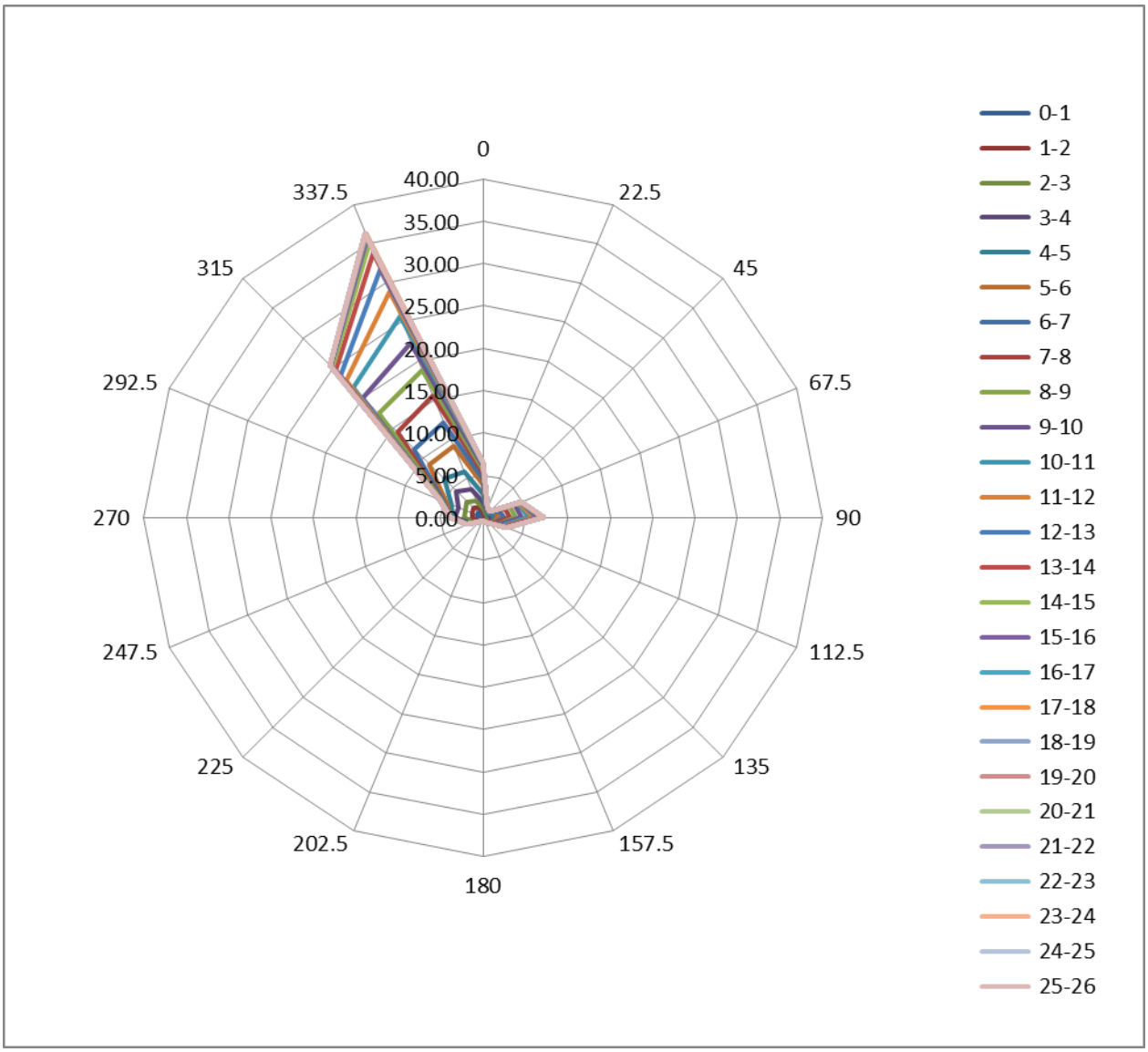
όπου T ο αριθμός των μηχανών και PR η μέγιστη ισχύς των μηχανών. Είναι προφανές ότι, επειδή στον αριθμητή υπάρχει το 8760 = 24·365, οι ώρες, δηλαδή του έτους, αρχικά οι μονάδές ενέργειας του ΑΕΠ μετατρέπονται σε μονάδες ισχύος. Έπειτα, το γεγονός ότι στον παρονομαστή υπάρχει ο αριθμός των μηχανών πολλαπλασιασμένος με τη μέγιστη ισχύ,

δείχνει ότι το CF είναι ο αριθμός που δείχνει πόσο αποδίδουν οι μηχανές του αιολικού πάρκου, κάτι που εξαρτάται από τις συχνότητες ανέμου των διευθύνσεων του πάρκου, αλλά και από τον ομόρρου που επιδρά στις μηχανές σε κάθε διεύθυνση. Βέβαια, είναι εμφανές ότι το CF εξαρτάται μόνο από το ΑΕΠ, και, ως εκ τούτου, μεγιστοποίηση του ενός έχει ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση του άλλου. Τελικά, αποφασίστηκε στο υποκεφάλαιο αυτό να μεγιστοποιηθεί το CF.

Στα δύο πρώτα υποκεφάλαια 3.α.1 και 3.α.2, η βελτιστοποίηση πρόκειται να γίνει σε αιολικά πάρκα τριών διαφορετικών μεγεθών, με 5, 15 και 40 ανεμογεννήτριες, πρώτα με το απλό ρόδο ανέμου Α, και ύστερα με το πιο σύνθετο Β. Εάν υποτεθεί ότι οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στο πάρκο σε σειρές και στήλες, τότε προκύπτει ότι οι διαστάσεις των πάρκων είναι 2026m x 1076m για τις 5 ανεμογεννήτριες, 3926m x 2026m για τις 15 ανεμογεννήτριες και 7726m x 3926m για τις 40 ανεμογεννήτριες. Να παρατηρηθεί φυσικά ότι οι θέσεις των ανεμογεννητριών έχουν απόσταση τουλάχιστον μία ακτίνα από τα όρια του αιολικού πάρκου, δηλαδή 63m. Ως εκ τούτου, το ενεργό τμήμα των χωραφιών είναι 1900m x 950m, 3800m x 1900m και 7600m x 3800m για 5, 15 και 40 ανεμογεννήτριες αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα EASY για κάθε μία από τις έξι παραπάνω περιπτώσεις ξεχωριστά, θα επιλεγούν οι συντεταγμένες x,y των ανεμογεννητριών που δίνουν μέγιστη παραγωγή ισχύος για κάθε αιολικό πάρκο. Το πρόγραμμα EASY απαιτεί την καταγραφή των μεταβλητών σχεδιασμού (design variables), δηλαδή των μεγεθών που πρόκειται να αλλαχθούν προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ένα μέγεθος, αλλά και των περιορισμών (constraints) που πρέπει να τηρηθούν. Στην περίπτωσή αυτή, οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι οι συντεταγμένες x,y των ανεμογεννητριών, που ο EASY θα επεξεργαστεί και θα μεταβάλλει με στόχο τη βελτιστοποίηση του CF του πάρκου. Πολύ σημαντικό σε αυτό το σημείο είναι να σημειωθεί ότι ο EASY ελαχιστοποιεί μεγέθη. Άρα, αφού επιθυμείταιη μεγιστοποίηση του CF, θα τεθεί ως συνάρτηση κόστους στον EASY να ελαχιστοποιήσει το –CF, ούτως ώστε να μεγιστοποιήσει το CF. Όσον αφορά τους περιορισμούς, αυτοί είναι οι αποστάσεις όλων των ανεμογεννητριών μεταξύ τους, οι οποίες απαγορεύεται να είναι μικρότερες από 1.5 επί μία διάμετρο, δηλαδή 189m. Ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού, με n αριθμό ανεμογεννητριών, είναι, σε κάθε περίπτωση, 2n, καθώς κάθε ανεμογεννήτρια έχει 2 συντεταγμένες x,y. Όσον αφορά τους περιορισμούς, βάσει αναδρομικού τύπου, αυτοί είναι $\frac{n\cdot(n-1)}{2}$ σε κάθε περίπτωση. Όμοια και με το μέγεθος βελτιστοποίησης, και οι περιορισμοί στον EASY είναι μέγιστα μεγεθών, δηλαδή δεν επιτρέπει λύση εάν σε αυτήν ο περιορισμός ξεπερνάει αλγεβρικά ένα συγκεκριμένο νούμερο. Στην παρουσα περίπτωση, όμως, εμείς δεν θέλουμε η απόσταση δύο ανεμογεννητριών να γίνει μικρότερη των 189m, άρα τίθεται ως constraint να μην ξεπεραστεί η τιμή -189 m (αλγεβρικά).

3.1.α

Στο υποκεφάλαιο 3.1.α θα αναλυθεί η επιλογή βέλτιστων συντεταγμένων των μηχανών του πάρκου με το απλούστερο ρόδο ανέμου Α, το οποίο είναι καταλληλότερο για βελτιστοποίηση από το ρόδο ανέμου Β, που θα χρησιμοποιηθεί σε επόμενο υποκεφάλαιο. Η μελέτη θα ξεκινήσει με το μικρότερο χωράφι των 5 ανεμογεννητριών. Οι ενεργές διαστάσεις του χωραφιού είναι 1900m μήκος και 950m πλάτος (αντίστοιχα άξονες x και y), όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, και το ρόδο ανέμου περιγράφεται με αθροιστικές συχνότητες για όλες τις ταχύτητες σε όλες τις κατευθύνσεις παρακάτω:



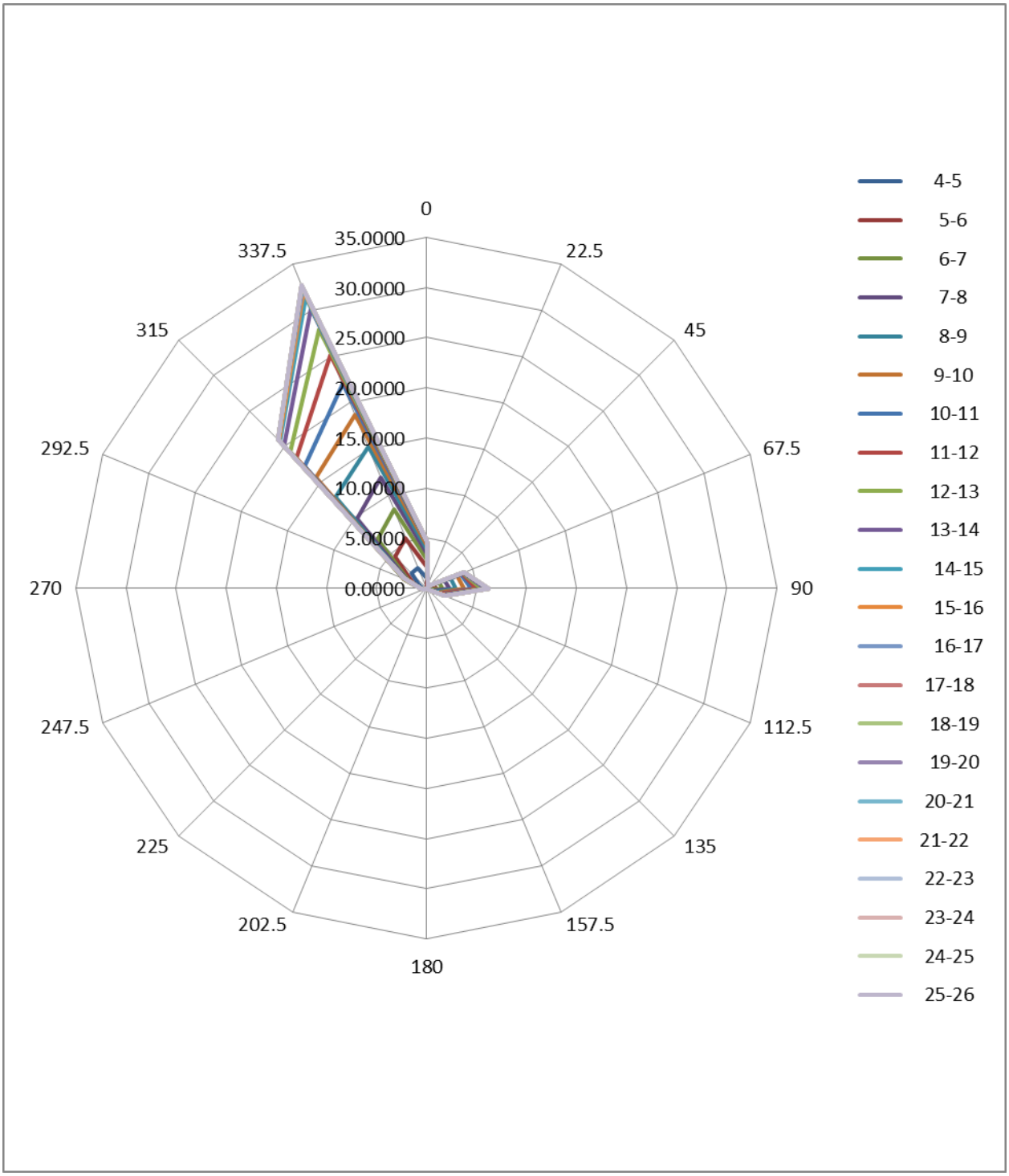
Σχ.3.α 1: Ρόδο ανέμου Α

Επειδή, όμως, οι μηχανές αποδίδουν σε ταχύτητες ανέμου 5m/s και άνω, μας ενδιαφέρουν οι συχνότητες ανέμου σε συτές τις ταχύτητες. Παρατίθενται και τα αναλυτικά νούμερα του ρόδου για αυτές τις ταχύτητες, πριν από τη σχηματική απεικόνηση του σχήματος:

	0.0	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0	202.5	225.0	247.5	270.0	292.5	315.0	337.5
4-5	1.028	0.127	0.109	0.296	0.437	0.199	0.033	0.003	0.003	0.015	0.024	0.241	0.380	0.826	2.057	2.210
5-6	1.040	0.090	0.139	0.519	0.486	0.139	0.015	0.000	0.000	0.003	0.006	0.075	0.160	0.648	2.394	3.233
6-7	0.754	0.048	0.051	0.546	0.669	0.145	0.015	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.440	2.521	3.076
7-8	0.624	0.018	0.048	0.630	0.697	0.208	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.196	2.871	3.384
8-9	0.428	0.012	0.030	0.615	0.606	0.217	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.124	3.037	3.332
9-10	0.428	0.009	0.021	0.679	0.796	0.217	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.109	2.702	3.435
10-11	0.256	0.000	0.012	0.416	0.718	0.211	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	1.647	3.338
11-12	0.121	0.012	0.003	0.154	0.594	0.211	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	1.122	3.188
12-13	0.018	0.003	0.000	0.093	0.446	0.136	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.929	2.802
13-14	0.003	0.000	0.000	0.072	0.419	0.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.814	2.129
14-15	0.000	0.000	0.000	0.030	0.220	0.084	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.540	1.300
15-16	0.000	0.000	0.000	0.006	0.112	0.066	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.268	0.591
16-17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.090	0.317
17-18	0.000	0.000	0.000	0.003	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.238
18-19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.090
19-20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027
20-21	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21-22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22-23	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23-24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24-25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25-26	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Πίν.3.α.1: Ακριβή νούμερα ρόδου ανέμου Α

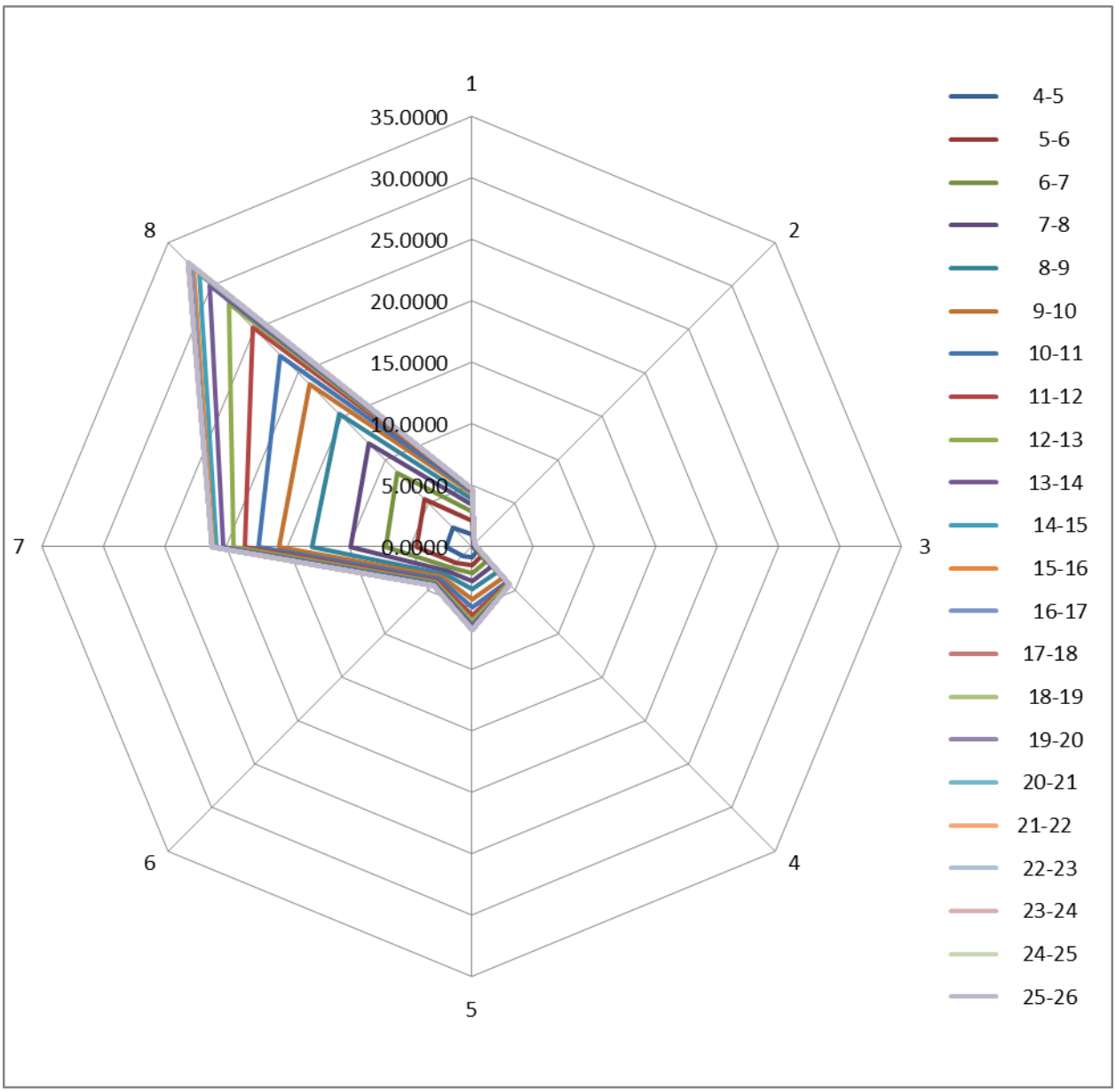
Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, ενώ ο κώδικας «τρέχει» ακέραιες ταχύτητες, το ρόδο έχει πιθανότητες για ενδιάμεσες ταχύτητες, δηλαδή 4.5, 5.5, ..., 25.5, οι οποίες αναγράφονται με τη μορφή 4-5, 5-6, ..., 25-26. Για να υπολογιστεί η συχνότητα στις ακέραιες ταχύτητες, χρησιμοποιείται, στον κώδικα, η υπορουτίνα γραμμικής παρεμβολής.



Σχ.3.α.2: Απεικόνιση ρόδου Α για ταχύτητες ανέμου του φάσματος λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Αξίζει να τονιστεί το γεγονός ότι, αν επιλεγεί μία συγκεκριμένη τοποθέτηση των μηχανών για μία διεύθυνση, οι μηχανές θα έχουν περίπου τις ίδιες επιδράσεις ομόρρου και στην

«απέναντι» διεύθυνση, δηλαδή σε αυτήν που βρίσκεται 180 μοίρες από την πρώτη. Αυτό σημαίνει, ουσιαστικά, ότι επιλέγονται ζευγάρια διευθύνσεων που βρίσκονται σε τέτοια διάταξη. Για το λόγο αυτό , αξίζει να παρατεθεί και ένα διάγραμμα που να απεικονίζει αθροιστικά τις συχνότητες, με 8 διευθύνσεις πλέον όπου η διεύθυνση 1 είναι 0-180 μοίρες η 2 είναι 22.5-202.5 κ.ο.κ.:



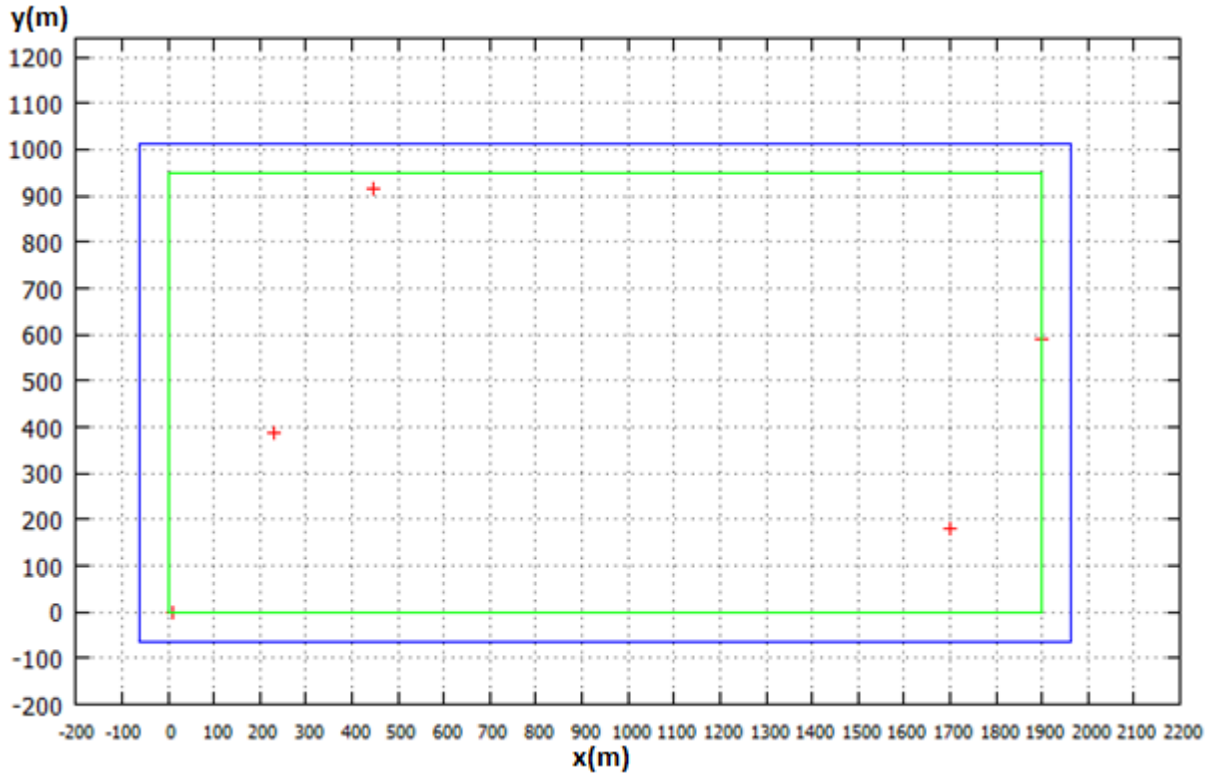
Σχ.3.α.3: Απεικόνιση ρόδου Α για ζευγάρια διευθύνσεων

Εδώ φαίνεται ότι η κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών, ορίζει, ουσιαστικά, και το ζευγάρι κυρίων διευθύνσεων, δηλαδή το ζευγάρι διευθύνσεων 157.5-337.5. Ακολουθεί το ζευγάρι 135-315, ενώ τα επόμενα είναι αρκετά πιο χαμηλά.

Η διεύθυνση των 315 μοιρών, που είναι η δεύτερη σε συχνότητα, είναι ανταγωνιστική της κύριας διεύθυνσης των 337.5 μοιρών, και μάλιστα στις μικρές ταχύτητες ανέμου την ξεπερνάει. Είναι πολύ θετικό το γεγονός ότι οι δύο αυτές διευθύνσεις είναι δίπλα-δίπλα, επομένως, η τοποθέτηση των μηχανών, με τρόπο ώστε να υπάρχει ελάχιστη επίδραση ομόρρου στην κύρια διεύθυνση, θα «βολεύει» αρκετά την τοποθέτηση των μηχανών με τον ίδιο τρόπο και στη διεύθυνση των 315 μοιρών. Επίσης, παρατηρώντας προσεκτικά το Σχ.3.α.2, μπορεί να δει κανείς ότι, από τις διευθύνσεις χαμηλής συχνότητας, αυτές των 22.5 και 202.5 μοιρών βρίσκονται ακριβώς «απέναντι» η μία από την άλλη. Αυτό «βολεύει» εξαιρετικά τη διαδικασία εύρεσης βέλτιστων συντεταγμένων, διότι, εάν οι μηχανές τοποθετηθούν σε μία από αυτές τις διευθύνσεις ώστε να υπάρχει μεγάλη επίδραση ομόρρου, ικανοποιούν ταυτόχρονα τον ίδιο σκοπό και για την άλλη διεύθυνση του ζευγαριού, για το λόγο που επεξηγήθηκε παραπάνω. Ως εκ τούτου, αν και η διεύθυνση των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι στις 180 μοίρες, ο EASY ενδέχεται να «επιλέξει» το ζευγάρι 22.5-202.5, αφού «απέναντι από τις 180 είναι οι 0, που έχουν αρκετή πιθανότητα ανέμου. Μπορεί κανείς πλέον να υποψιαστεί ότι ο EASY θα επιλέξει να κατατάξει τις μηχανές ώστε να έχουν ελάχιστη επίδραση ομόρρου, στο ζευγάρι διευθύνσεων 157.5-337.5 γιατί αθροιστικά έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα στο ρόδο, ενώ για μέγιστη επίδραση ομόρρου στο ζευγάρι διευθύνσεων 22.5-202.5, που έχουν τη μικρότερη αθροιστική πιθανότητα. Πολύ θετικό επίσης, είναι το ότι το δεύτερο ασθενέστερο ζευγάρι, το 45-225, είναι «δίπλα» στο πρώτο των 22.5-202.5 μοιρών.

Στην περίπτωση των 5 ανεμογεννητριών, θα φανεί καθαρά η «επιλογή» του EASY. Στα μεγαλύτερα πάρκα των 15 και, ιδίως, των 40 ανεμογεννητριών, αυτό δεν θα είναι τόσο σαφές, καθώς οι τόσες πολλές επιδράσεις ομόρρου δεν θα επιτρέψουν στον EASY να «ασχοληθεί» μόνο με τα ζευγάρια μεγαλύτερων και μικρότερων συχνοτήτων, και θα «προσπαθήσει» να τοποθετήσει τις μηχανές με γνώμονα όλες τις διευθύνσεις.

Όλα τα παραπάνω θα διαλευκανθούν με σιγουριά στις απεικονήσεις ομόρρου και ισχύος των μηχανών σε κάποιες διευθύνσεις. Παρακάτω φαίνεται το βέλτιστο πάρκο των 5 μηχανών για το ρόδο ανέμου Α του Σχ.3.α.2:



Σχ.3.α.4: Βελτιστοποιημένο πάρκο 5 ανεμογεννητριών με το ρόδο Α.

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	x(m)	y(m)
1	447.828	916.282
2	8.067	0.783
3	1699.180	181.857
4	229.875	388.182
5	1900.000	588.022

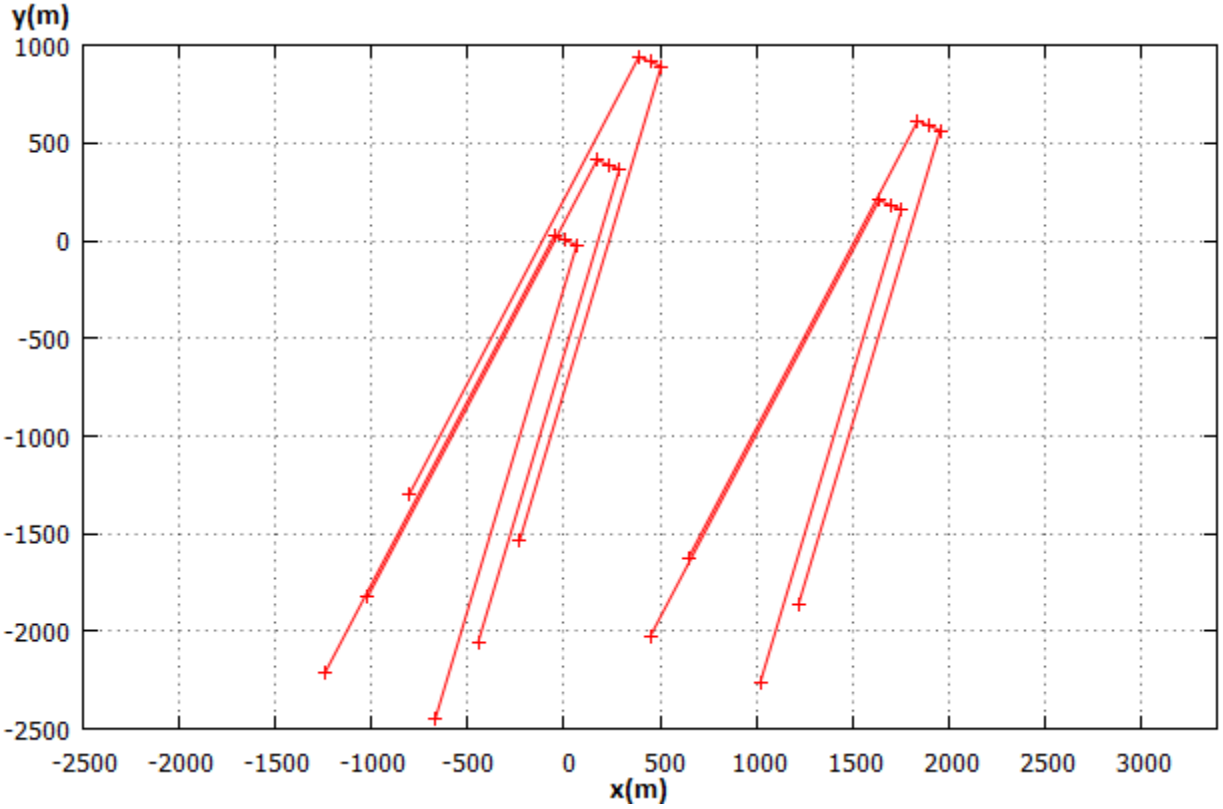
Πίν.3.α.1: Συντεταγμένες x,y των ανεμογεννητριών

Με το μπλε πλαίσιο απεικονίζεται όλο το χωράφι, με πράσινο το ενεργό μέρος του,όπου και έχει τοποθετηθεί η αρχή των αξόνων (0,0) και με κόκκινους σταυρούς οι θέσεις των μηχανών.

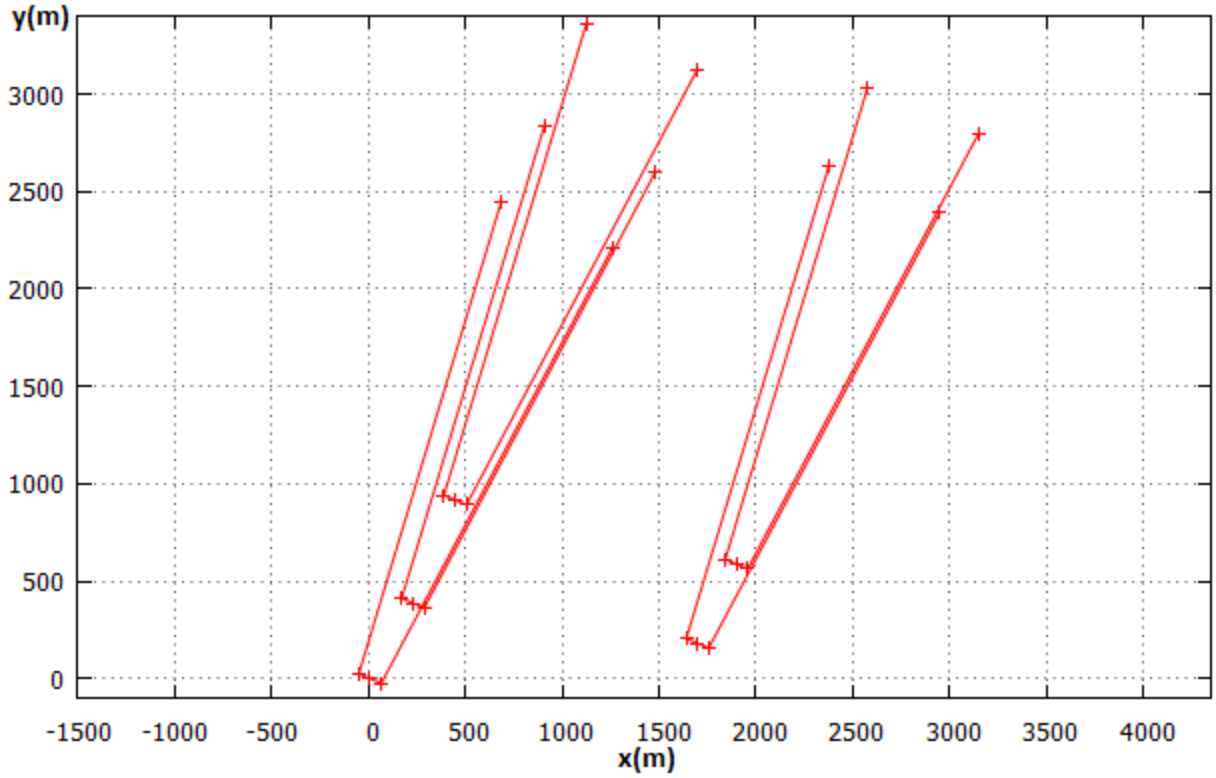
Όπως αναμενόταν είναι εμφανής η επιλογή του EASY να κατατάξει τις μηχανές σε δύο σειρές, έτσι ώστε να δέχονται μέγιστη επίδραση ομόρρου στο ζευγάρι διευθύνσεων 22.5-202.5. Φυσικά εάν το πλάτος του χωραφιού το επέτρεπε, θα μπορούσαν να τοποθετηθούν όλες οι μηχανές η μία πίσω από την άλλη στις διευθύνσεις 22.5-202.5. Αν επιλεγόταν αυτή η διάταξη σε αυτό το χωράφι, που έχει πλάτος 950.0m, αναγκαστικά οι αποστάσεις των 5 μηχανών θα ήταν πολύ μικρές, η επίδραση ομόρρου πολύ μεγάλη, επομένως, και η απώλεια ενέργειας, παρά τη μικρή συχνότητα διεύθυνσης. Και πάλι, όμως, με την τοποθέτηση σε δύο σειρές,

«βολεύει» η μικρή συχνότητα του ρόδου στο κάθετο ζευγάρι διευθύνσεων 112.5-292.5, όπου η επίδραση ομόρρου από τη μία σειρά στην άλλη είναι έντονη. Εύκολα παρατηρεί κανείς, ότι, στην κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών, δεν υπάρχει η παραμικρή επίδραση ομόρρου, όπως επίσης και σε αυτή των 315 μοιρών, όπου και εκεί η συχνότητα του ρόδου είναι αρκετά υψηλή. Για να δοθεί μία σαφέστατη εικόνα των επιδράσεων, παρατίθενται παρακάτω οι απεικονήσεις ομόρρου στις σημαντικότερες διευθύνσεις ανέμου.

Αρχικά για το ζευγάρι 22.5-202.5, θα απεικονιστούν και οι δύο αυτές διευθύνσεις, αν και έχουν ελάχιστες διαφορές:

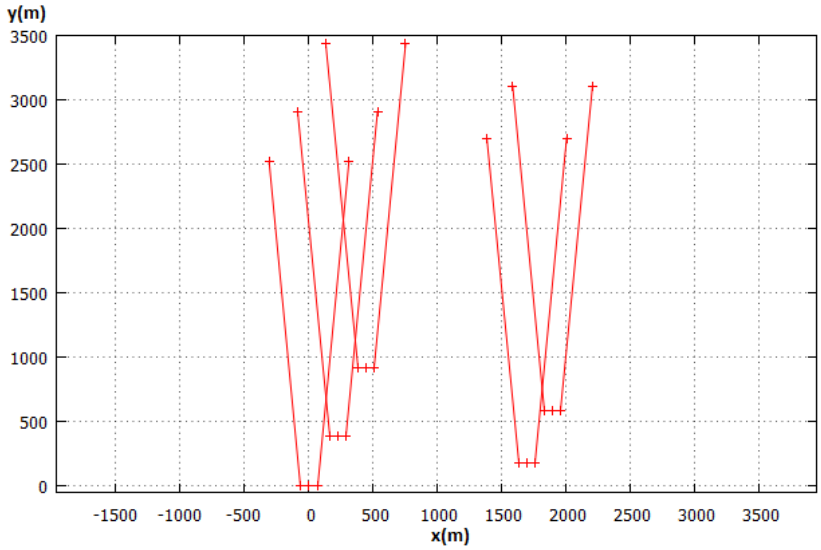


Σχ.3.α.5: Απεικόνιση ομόρρου 22.5°



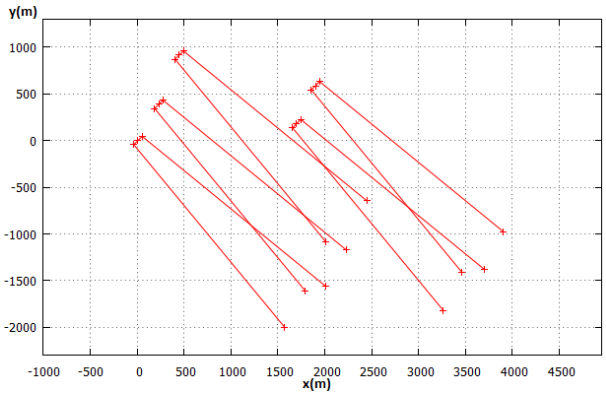
Σχ.3.α.6: Απεικόνιση ομόρρου 202.5^{o}

Είναι εμφανής και στις δύο διευθύνσεις η τεράστια επίδραση ομόρρου μεταξύ των μηχανών, αποτέλεσμα της επιλογής του EASY να τις τοποθετήσει έτσι. Αν και όπως φαίνεται από το ρόδο ανέμου στο Σχ.3.α.2, η πιο «σπάνια» διεύθυνση είναι οι 180 μοίρες, αξίζει να παρατεθεί η απεικόνηση του ομόρρου σε αυτή τη διεύθυνση:

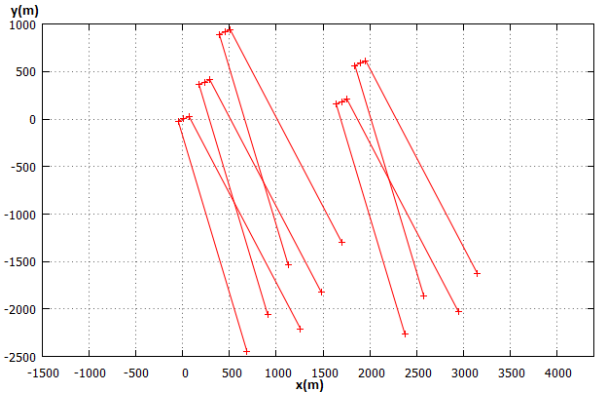


Σχ.3.α.7: Απεικόνιση ομόρρου 180°

Οι απώλειες ομόρρου είναι μηδενικές, διότι η απέναντι διεύθυνση είναι οι 0 μοίρες, που έχουν σχετικά μεγάλη συχνότητα ανέμου. Άρα ο EASY, για να «αποφύγει» την ύπαρξη επίδρασης ομόρρου στς 0 μοίρες, αναγκαστικά θα κάνει το ίδιο και για τις 180. Άλλη μία απόδειξη του πόσο σημαντική είναι η αθροιστική συχνότητα των «απέναντι» διευθύνσεων για τη βελτιστοποίηση του πάρκου. Παρακάτω παρατίθενται οι απεικονήσεις ομόρρου για 315 και 337.5, που είναι και οι κυριότερες διευθύνσεις:



315°

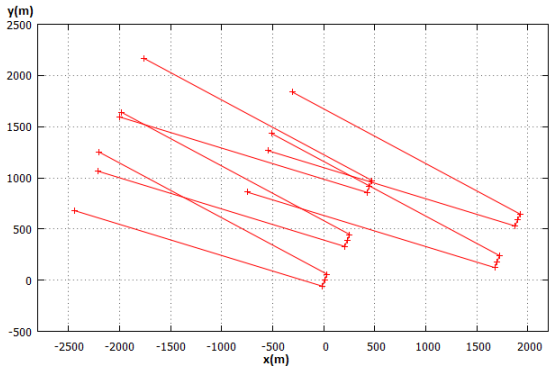


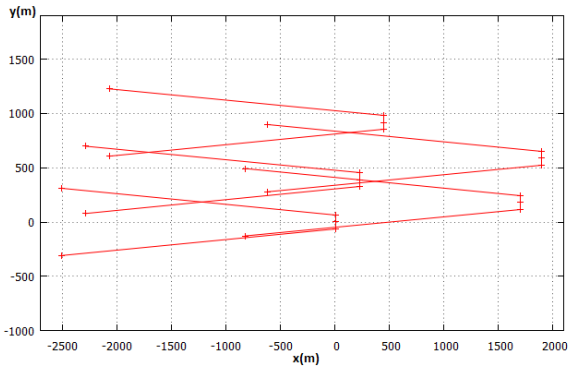
337.5^{o}

Σχ.3.α.8: Απεικονίσεις ομόρρου 315° και 337.5^{o}

Προφανώς και σε αυτές τις διευθύνσεις οι μηχανές παράγουν όσο το δυνατόν περισσότερη ισχύ, καθώς δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση ομόρρου.

Η τοποθέτηση των μηχανών από τον EASY με αυτό τον τρόπο, υστερεί στις διευθύνσεις που ορίζουν την κάθετη απόσταση μεταξύ των δύο σειρών των μηχανών, δηλαδή τις 112.5-292.5, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αλλά και στις διευθύνσεις 90-270, όπου υπάρχει αλληλεπίδραση ομόρρου μεταξύ των μηχανών, και για το λόγο αυτό οι δύο σειρές των μηχανών βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο μακριά η μία από την άλλη. Όσον αφορά το πρώτο ζευγάρι, η απώλεια ισχύος είναι μικρή λόγω ιδιαίτερα μικρών συχνοτήτων ανέμου. Στις 90 μοίρες, όμως, υπάρχει αρκετά αυξημένη συχνότητα συμφωνα με το ρόδο. Ακολουθούν οι απεικονήσεις ομόρρου:

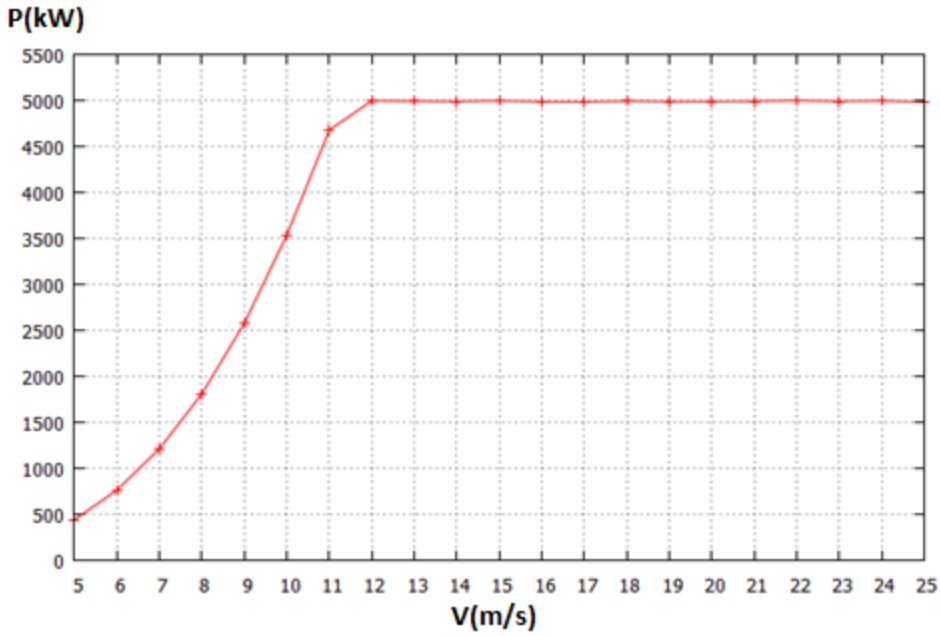




Σχ.3.α.9: Απεικονίσεις ομόρρου 112.5^o και 90°

Για τις 292.5 και 270°, αντίστοιχα, τα αποτελέσματα είναι περίπου όμοια.

Αναμφίβολα, οι καμπύλες ισχύος των μηχανών στις διάφορες διευθύνσεις, αποτελούν ισχυρότατο αποδεικτικό στοιχείο για να κατανοήσει κανείς το μέγεθος της επίδρασης ομόρρου, σε κάθε περίπτωση. Στην κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών, η καμπύλη ισχύος, για ταχύτητα πάρκου από 5m/s και άνω (κάτω από 5m/s, POWER=0) είναι η ακόλουθη:



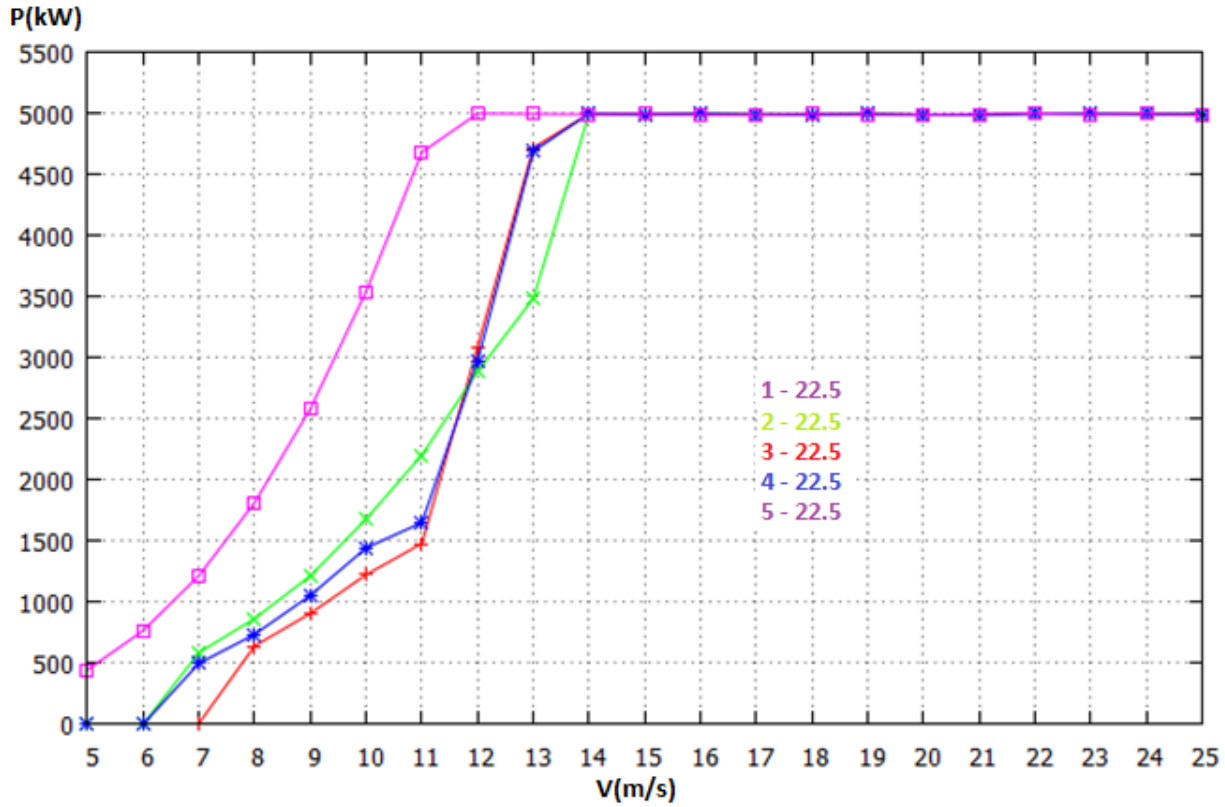
Σχ.3.α.10: Ιδανική καμπύλη ισχύος

Είναι η ιδανική, και είναι όμοια για όλες τις μηχανές στην κύρια διεύθυνση.

Στην περίπτωση των διευθύνσεων 22.5 και 202.5 μοιρών, μόνο δύο μηχανές έχουν την παραπάνω καμπύλη ισχύος σε αυτές τις διευθύνσεις, οι 1 και 5 στις 22.5 μοίρες και οι 2 και 3 στις 202.5 μοίρες.

Γενικά, όσο μεγαλύτερη η επίδραση ομόρρου σε μία μηχανή, τόσο πιο μειωμένη ταχύτητα ανέμου δέχεται η μηχανή σε σχέση με αυτήν του πάρκου. Εάν σε μία μηχανή υπάρχει, έστω και η παραμικρή επίδραση ομόρρου, στα 5m/s του πάρκου, αυτή δέχεται σίγουρα λιγότερο από 5m/s, άρα, αντί να αποδίδει τα 442 kW ηλεκτρικής ισχύος, θα παράγει 0. Εάν η επίδραση ομόρρου είναι μεγάλη, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η μηχανή να δέχεται άνεμο με ταχύτητα κάτω των 5m/s σε ταχύτητες πάρκου 6m/s ή και μεγαλύτερες και επομένως να χρειάζεται μεγάλη ταχύτητα ανέμου του πάρκου για να αρχίσει να παράγει ισχύ. Το πόσο μεγάλη είναι η επίδραση ομόρρου σε μία μηχανή εξαρτάται από τον αριθμό των μηχανών από τις οποίες δέχεται ομόρρου, από τις μεταξύ τους αποστάσεις, αλλά και από το πόσο συνευθειακές είναι

οι κεντρικές γραμμές στους ομόρρους των μηχανών. Φυσικά, όλες αυτές οι παράμετροι περιγράφονται και υπολογίζονται ικανοποιητικά από το μοντέλο Abramovich και το μοντέλο αλληλεπίδρασης που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 2. Παρακάτω αποτυπώνονται οι καμπύλες ισχύος όλων των μηχανών στη διεύθυνση των 22.5 μοιρών:

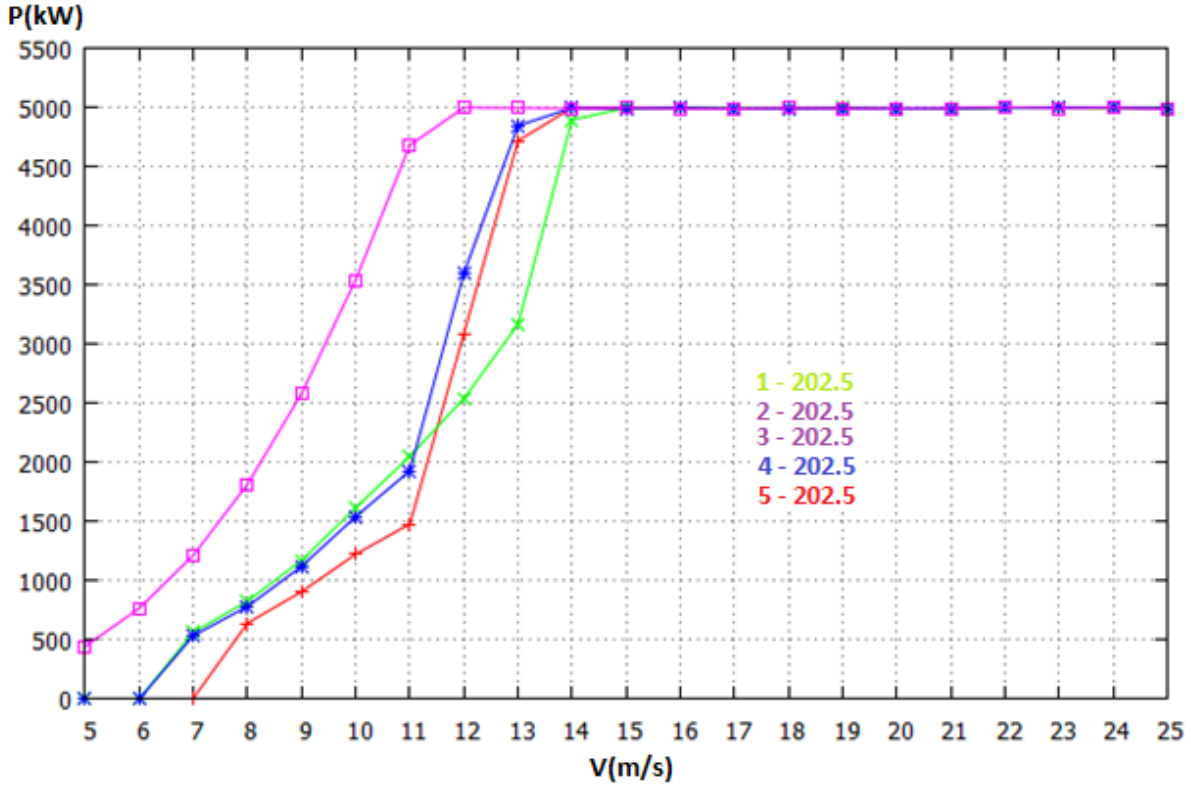


Σχ.3.α.11: Απεικόνιση καμπυλών ισχύος των ανεμογεννητριών στις 22.5°

Με τη μωβ γραμμή απεικονίζεται η ιδανική καμπύλη ισχύος των μηχανών 1 και 5. Η μηχανή 3, που, για μικρές ταχύτητες ανέμου, έχει το μεγαλύτερο έλλειμα ισχύος, μέχρι και για ταχύτητα ανέμου πάρκου 7m/s παράγει μηδενική ισχύ. Εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι η μηχανή 2 με την πράσινη γραμμή, ενώ δέχεται πολλαπλό ομόρρου , έχει το μικρότερο έλλειμμα, για μικρά V, από τις 3, αλλά και το ότι, όταν V≥11m/s, η απόδοσή της είναι χαμηλότερη από των μηχανών 2 και 4. Επίσης, σε απόδοση ξεπερνάει στα 11m/s και τις δύο η μηχανή 3, που άρχισε να αποδίδει ισχύ τελευταία από όλες, στα 8m/s! Αρχικά θα αναλυθεί η απόδοση των μηχανών 3 και 4, καθώς αυτές δέχονται απλό ομόρρου. Παρτηρείται εύκολα ότι η απόσταση της 1 από την 4 είναι μεγαλύτερη από ότι η απόσταση της 5 από την 3. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, η 3 να βρίσκεται κάτω από την 4. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η 4 βρίσκεται πάνω στην κεντρική γραμμή του ομόρρου της 1, ενώ η 5 αρκετά μακριά από την κεντρική γραμμή του ομόρρου της 3. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, στις μεγάλες ταχύτητες ανέμου, όπου το Ct μικραίνει, και ως εκ τούτου από μοντέλο Abramovich, αρχίζει να μεγαλώνει ο δυναμικός πυρήνας, δηλαδή από 10m/s και άνω, η διαφορά των 3 και 4 να

μειώνεται, διότι στην κεντρική γραμμή υπάρχει μεγαλύτερο έλλειμα ταχύτητας, το οποίο και δέχεται πολύ περισσότερο η 4. Επιπλεόν, όταν ο δυναμικός πυρήνας της 1 φτάσει σε μήκος την απόσταση των 1-4, η μηχανή 3 φτάνει και ξεπερνάει ελάχιστα την 4. Όσον αφορά τη 2, επειδή δέχεται πολλαπλό ομόρρου (από 1 και 4), σύμφωνα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, «καταλαβαίνει», όχι μόνο την ταχύτητα ανέμου που επάγει η 4, αλλά και η 1. Έτσι, σύμφωνα, πάλι, με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα μέσα σε πολλαπλό ομόρρου φτάνει στην ελάχιστη τιμή της στην πρώτη μηχανή που δέχεται ομόρρου, δηλαδή την 4 και μετά αυξάνεται λίγο, με αποτέλεσμα στις μικρές ταχύτητες η 2 να είναι πάνω από την 4 σε ισχύ, και, ως εκ τούτου, πάνω και από την 3. Ωστόσο, με γνώμονα το μοντέλο αλληλεπίδρασης, σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα του ανέμου έχει μεγάλη πτώση στην πρώτη μηχανή που δέχεται ομόρρου, την 4, αλλά συνεχίζει να ελαττώνεται στις πιο πίσω μηχανές, εδώ στη 2. Για αυτό, λοιπόν, η καμπύλη της 2 είναι τόσο χαμηλότερα από της 4 και, άρα, και από της 3, σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

Ακολουθούν και οι καμπύλες ισχύος των μηχανών για τις 202.5 μοίρες:

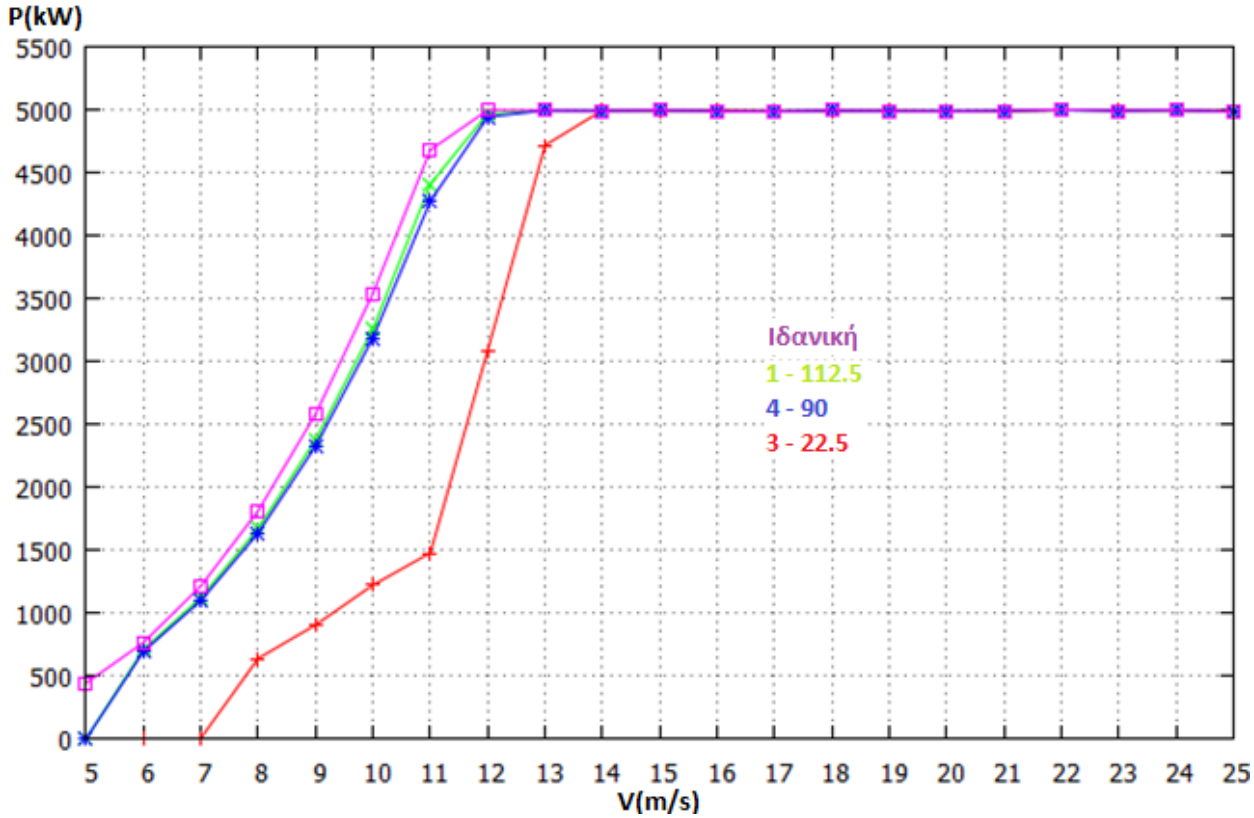


Σχ.3.α.12: Καμπύλες ισχύος των μηχανών στις 202.5^{o}

Σε σχέση με τις 22.5 μοίρες, έχει να παρατηρηθεί ότι, και εδώ, η πιο «φορτισμένη» μηχανή στις χαμηλές ταχύτητες βρίσκεται στη σειρά με τις δύο μηχανές, πλέον, η μηχανή 5.Επειδή οι

αποστάσεις των μηχανών 1-4, 4-2 και 5-3 δεν διαφέρουν πολύ, σύμφωνα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, οι μηχανές 4 και 5 που δέχονται απλό ομόρρου, αποδίδουν μικρότερη ισχύ για χαμηλές ταχύτητες ανέμου από την 1 που δέχεται πολλαπλό ομόρρου, κάτι που, πράγματι, συμβαίνει. Ειδικά η 5, αποδίδει πολύ μικρότερη ισχύ σε αυτές τις ταχύτητες και από την μηχανή 4, καθότι, έχουν μεν ίδια απόσταση από τις 3 και 2 αντίστοιχα, η 5, όμως, βρίσκεται πιο κοντά στην κεντρική γραμμή της 3 από ότι η 4 στην κεντρική γραμμή της 2, για αυτό και είναι τόσο χαμηλότερη η απόδοσή της. Η μοναδική μηχανή που δέχεται διπλό ομόρρου από αυτές που δέχονται διαταραγμένη ταχύτητα ανέμου είναι η μηχανή 1, που δέχεται ομόρρου από τις μηχανές 2 και 4, και για το λόγο αυτό ,σύμφωνα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, αποδίδει τη μικρότερη ισχύ στο φάσμα ταχυτήτων ανέμου 11.5-15m/s.

Για να γίνει κατανοητό το πόσο μεγάλη επίδραση ομόρρου δέχονται οι μηχανές 3 και 5 στις 22.5 και 202.5 μοίρες, αντίστοιχα, συγκρίνεται η καμπύλη ισχύος μίας εκ των δύο, έστω της 3 στη διεύθυνση των 22.5 μοιρών με τις πιο φορτισμένες μηχανές στις 112.5 και 90 μοίρες , δηλαδή τις 1 και 4 και με την ιδανική καμπύλη ισχύος:

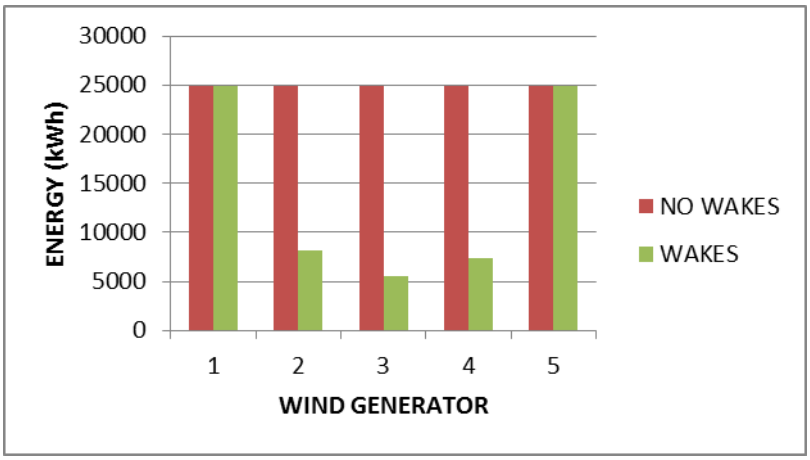


Σχ.3.α.13: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 1 στις 112.5^o, 4 στις 90° και 3 στις 22.5^o.

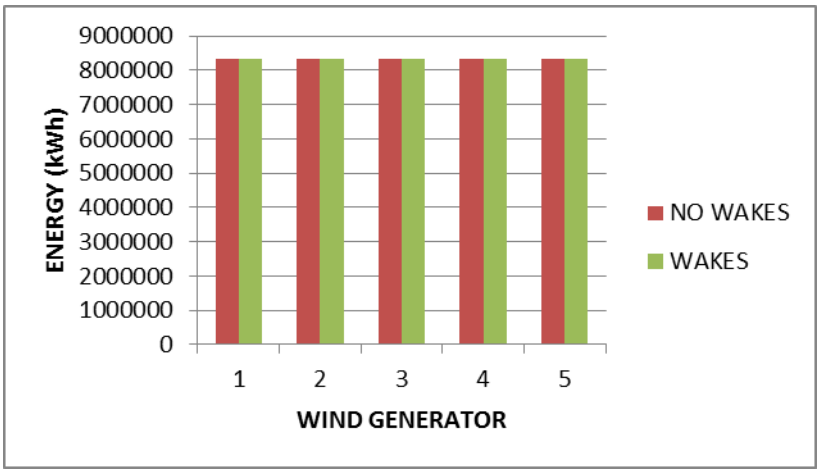
Οι καμπύλες της μηχανής 4 για τις 90 μοίρες και της 1 για τις 112.5 μοίρες προσεγγίζουν σχεδόν την ιδανική καμπύλη, ενώ η μηχανή 3 στις 22.5 χάνει πολύ μεγάλα ποσά ισχύος μέχρι

και τα 14m/s ταχύτητα ανέμου. Από τα Σχ.3.α.11 και Σχ.3.α.13 , πανομοιότυπη φαίνεται να είναι η καμπύλη ισχύος της 3 με την 5 στς 22.5 και 202.5 μοίρες, αντίστοιχα. Οπότε, από τα παραπάνω σχήματα με τις καμπύλες ισχύος φαίνεται πεντακάθαρα η επιλογή του EASY να τοποθετήσει τις μηχανές, έτσι ώστε να έχουν τη μέγιστη αλληλεπίδραση ομόρρου, στο ζεύγος διευθύνσεων 22.5-202.5.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ακόλουθα διαγράμματα που απεικονίζουν το ποσό ενέργειας που παράγουν η κάθε μηχανή (πράσινο) στις 22.5 μοίρες και στις 337.5, σε σχέση με αυτό που θα παρήγαγε αν δεν υπήρχε ομόρρους:



22.5°

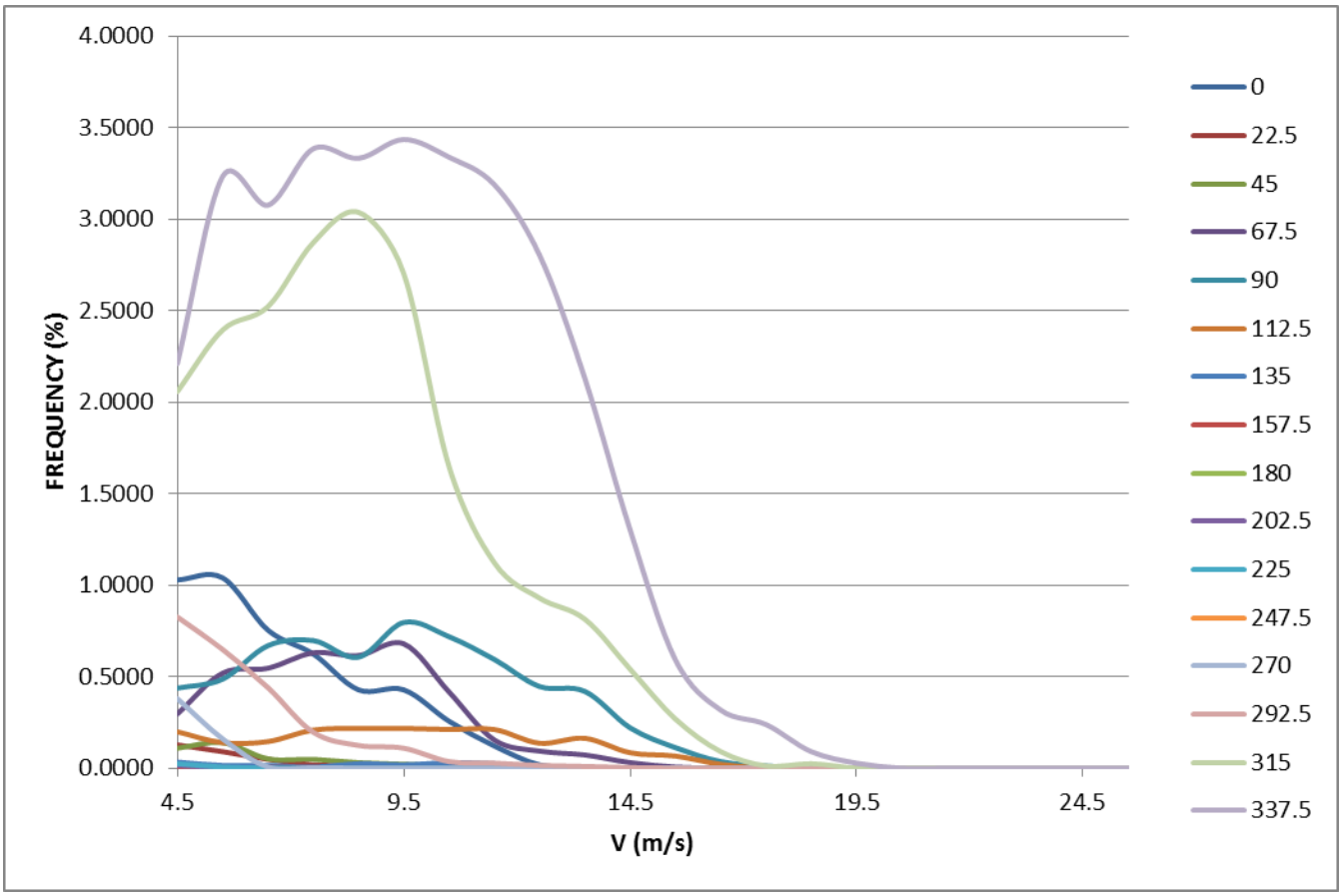


337.5°

Σχ.3.α.14: Διαγράμματα ποσοστού αποδιδόμενης ενέργειας των μηχανών στις 22.5° και 337.5°

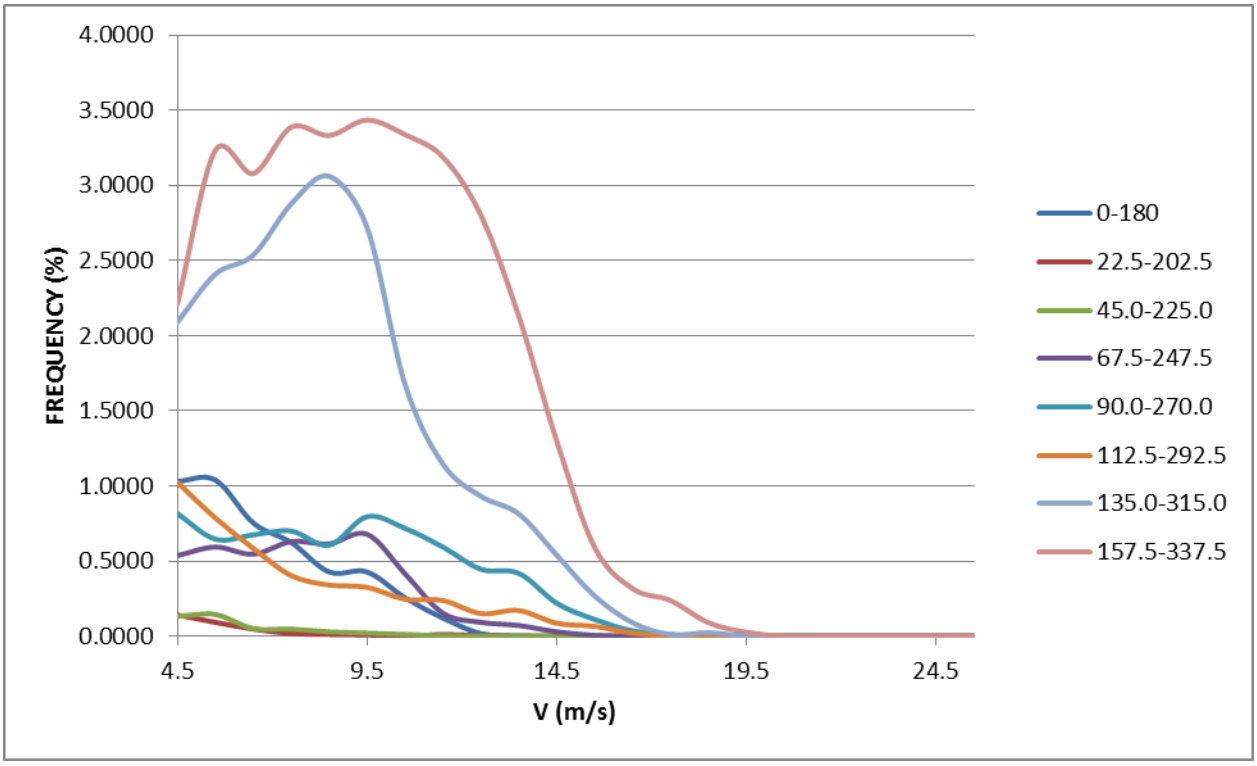
Λόγω του Πίν.3.α.1 και του Σχ.3.α.2 , έχει θεωρηθεί ως η κύρια διεύθυνση οι 337.5 μοίρες, με συνολική πιθανότητα 32.69% . Ωστόσο, υπάρχει πιθανότητα μία άλλη διεύθυνση, η οποία έχει

μικρότερη συνολική πιθανότητα, να έχει πολύ μεγαλύτερες πιθανότητες από τη κύρια σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου, όπου και παράγεται πολύ μεγαλύτερη ισχύς. Άλλωστε, αν σκεφτεί κανείς ότι στα 5m/s παράγεται λιγότερο από το 1/10 της ισχύος που παράγεται στα 12m/s (442 kW έναντι 5000kW), είναι φανερό ότι αρκεί υποδεκαπλάσια πιθανότητα στα 12m/s για να ξεπεραστεί η ενέργεια που θα παραχθεί στα 5m/s. Άρα, σημασία δεν έχει μόνο η συνολική πιθανότητα αλλά και μεμονομένα οι πιθανότητες για κάθε ταχύτητα. Το επόμενο διάγραμμα είναι αρκετά διαφωτιστικό, ξεκινώντας από ταχύτητα ανέμου 5m/s:



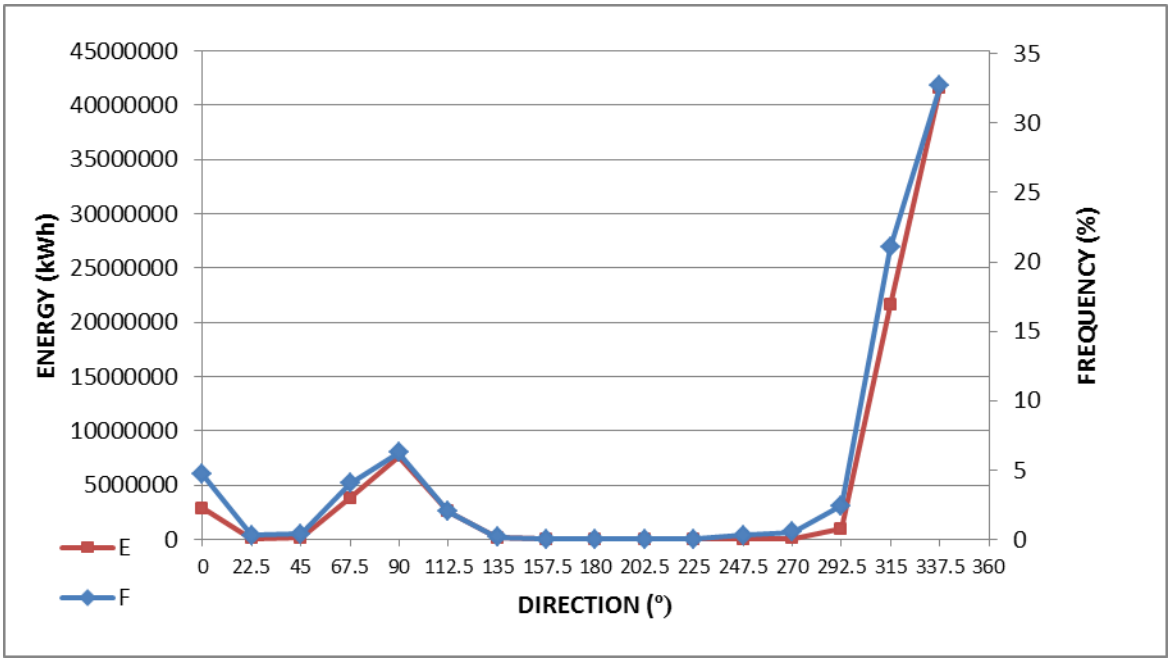
Σχ.3.α.15: Καμπύλη συχνοτήτων ρόδου Α για όλες τις διευθύνσεις

Όμοια και για τις αθροιστικές συχνότητες για κάθε ταχύτητα των απέναντι διευθύνσεων:



Σχ.3.α.16: Καμπύλες συχνοτήτων ρόδου για όλα τα ζευγάρια διευθύνσεων

Εδώ βέβαια, δε συμβαίνει κάτι τέτοιο, διότι, όχι μόνο οι 337.5 έχουν την μεγαλύτερη πιθανότητα, αλλά είχαν στις μικρές ταχύτητες μικρότερη των 315 και μετά τα 12m/s τις ξεπέρασαν τη συνολική πιθανότητα. Επομένως, και φυσικά βάση του γεγονότος ότι και στις δύο διευθύνσεις δεν υπάρχει επίδραση ομόρρου, αν η αναλογία συνολικών πιθανοτήτων είναι 0.36341/0.25488=1.42581, αναμένεται η αναλογία απόδοσης ενέργειας να είναι ακόμα μεγαλύτερη. Είναι αυτονόητο ότι για να γίνει τέτοιου είδους σύγκριση πρέπει στις συγκρινόμενες διευθύνσεις να υπάρχει στις μηχανές όμοια επίδραση ομόρρου (να δέχονται οι μηχανές ίδια ταχύτητα ανέμου για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου του πάρκου). Τα παραπάνω θα απεικονιστούν με λεπτομέρεια στο επόμενο διάγραμμα που συσχετίζει ενέργεια ανά κατεύθυνση και πιθανότητα ανά κατεύθυνση.



Σχ.3.α.17: Καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων και παραγωγής ενέργειας σε κάθε διεύθυνση.

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες με τις τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας και τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας:

DIRECTION(°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)
337.5	32.69	41613922.21
315	21.028	21571402.76
90	6.248	7638336.249

Πιν.3.α.2: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας

DIRECTION(°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)/FREQUENCY (%)
112.5	2.017	1281933.198
337.5	32.69	1272986.302
90	6.248	1222525.008

Πίν.3.α.3: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ενέργεια ανά μονάδα συχνότητας

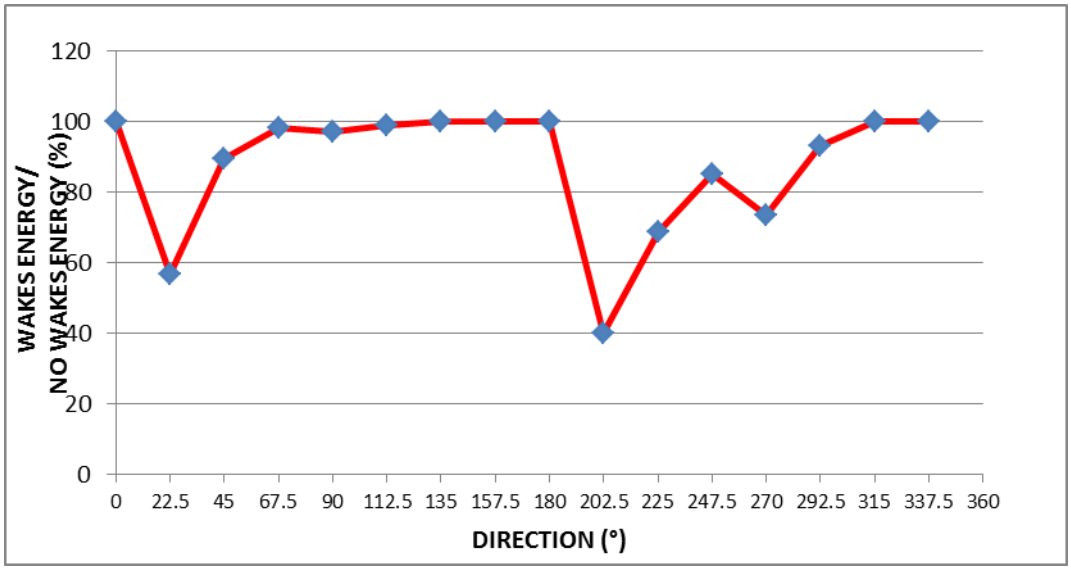
Είναι φανερό το πόσο σημαντικό είναι να μη χάνεται ενέργεια στις κύριες διευθύνσεις, καθώς, βάση του Σχ.3.α.17 και του Πιν.3.α.3 συμβάλλουν δραστικότατα στη μεγιστοποίηση του ΑΕΠ, και, επομένως του CF.

Παρόλα αυτά, υπάρχει διεύθυνση που ξεπερνά και την κύρια των 337.5 μοιρών, και αυτή είναι η διεύθυνση των 112.5 μοιρών, παρότι εκεί υπάρχουν και αλληλεπιδράσεις ομόρρου. Αυτό οφείλεται στο ότι, όπως φαίνεται και στο Σχ.3.α.2, στη διεύθυνση των 112.5 υπάρχουν συχνότητες σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, χωρίς όμως να υπάρχει μεγάλη αναλογική διαφορά με τις συχνότητες χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, όπως συμβαίνει στις 337.5 μοίρες.

Στο Σχ.3.α.17, μπορεί κανείς να συμπεράνει σε ποια διεύθυνση υπάρχει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας, από τη σχετική θέση της κόκκινης με τη μπλε καμπύλη στις διάφορες διευθύνσεις ,εκτός κι αν αυτές έχουν συχνότητα ανέμου κοντά στο μηδέν, οπότε, αφού και η αποδιδόμενη ενέργεια είναι κοντά στο 0, οι δύο καμπύλες συμπίπτουν. Φαίνεται, λοιπόν , και από το Σχ.3.α.17, ότι οι διευθύνσεις 112.5, 337.5 και 90 μοιρών, έχουν τα «πρωτεία» όσον αφορά το μέγεθος αυτό.

Αξίζει να καταγραφεί η αναλογία παραγωγής ενέργειας στις δύο κύριότερες διευθύνσεις 337.5 και 315 μοίρες, που είναι, από αποτελέσματα του κώδικα, 41613922/21571403=1.92912 > 1.42581, που είναι η αναλογία συχνότητας ανέμου στις δύο αυτές διευθύνσεις. Είναι πολύ βοηθητικό το γεγονός ότι οι δύο διευθύνσεις έχουν μηδενικό ομόρρου σε κάθε μηχανή, καθώς αυτή η καθαρή (χωρίς επιδράσεις) αναλογία θα μας επιτρέψει να κάνουμε συσχετίσεις στα πάρκα των 15 και 40 ανεμογεννητριών, για να συμπεράνουμε σε πια από τις δύο κύριες διευθύνσεις οι μηχανές έχουν μεγαλύτερες αλληλεπιδράσεις ομόρρου.

Πολύ σημαντική πληροφορία για το πάρκο είναι και το ποσοστό ενέργειας που παράγεται σε κάθε διεύθυνση, σε σχέση με αυτό που θα παρήγαγε χωρίς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανών, καθώς δείχνει και σε ποιες διευθύνσεις υπάρχουν μεγάλες απώλειες λόγω ομόρρου:

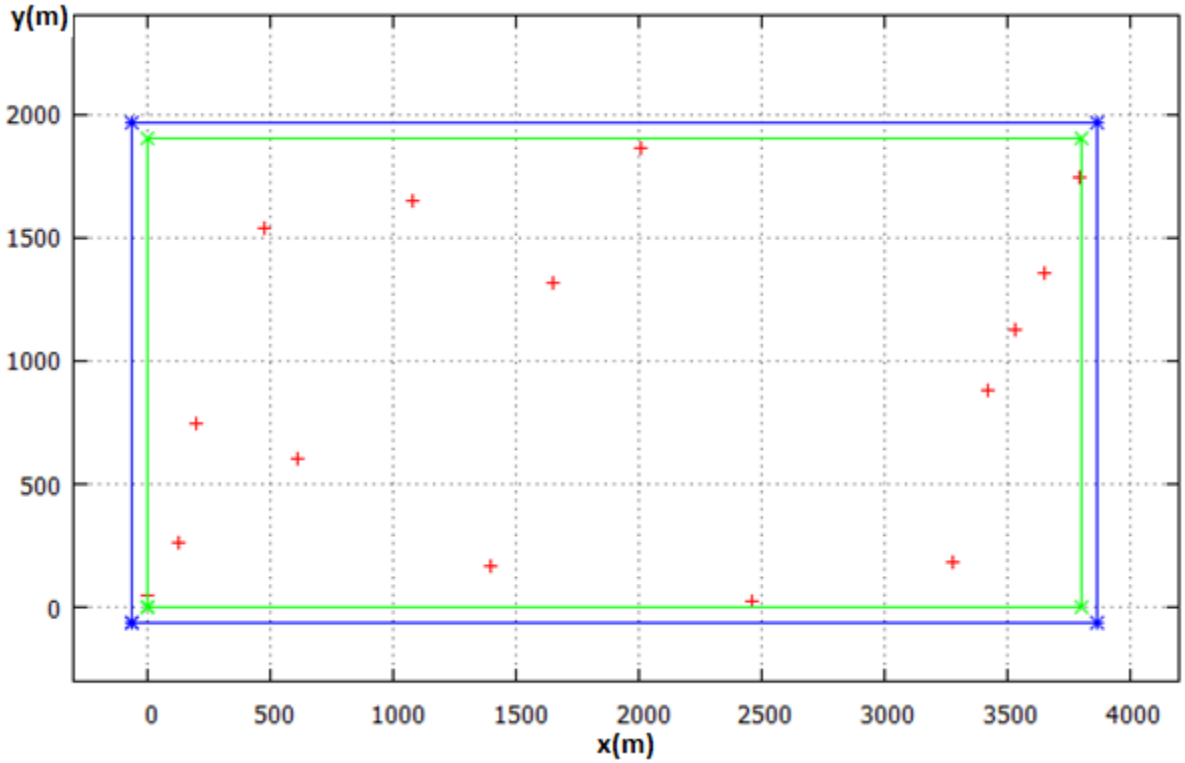


Σχ.3.α.18: Ποσσστό % αποδιδόμενης ενέργειας σε κάθε διεύθυνση προς την ενέργεια που θα αποδοδίταν χωρίς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανών

Το παραπάνω διάγραμμα αποτελεί πειστήριο για το ότι η τοποθέτηση των μηχανών από τον EASY έχει γίνει με σκοπό την αλληλεπίδραση των μηχανών στο ασθενέστερο αθροιστικά ζευγάρι διευθύνσεων 22.5-202.5. Άξιο παρατήρησης είναι, για ακόμα μια φορά, ότι δεν υπάρχει απώλεια ενέργειας στην ασθενέστερη διεύθυνση των 180 μοιρών, διότι, αθροιστικά με την «απέναντί» της συντελούν ζευγάρι διεθύνσεων σχετικά υψηλής συχνότητας.

Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας ΑΕΠ στο πάρκο των 5 ανεμογεννητριών με το ρόδο ανέμου Α, για όλες τις διευθύνσεις ανέμου, ταχύτητες ανέμου και μηχανές, με τις συντεταγμένες των μηχανών που επέλεξε ο EASY, ανέρχεται στις 81524070 kWh, με CF_{1A} = 0.37226. Από το CF, επίσης μπορεί να γίνει αντιληπτό το πόσο μεγάλη είναι η συνολική επίδραση ομόρρου, για όλες τις μηχανές, διευθύνσεις και ταχύτητες ανέμου, καθότι μπορεί να συγκριθεί με το CF που θα είχε μία μηχανή που λειτουργεί χωρίς επίδραση ομόρρου όλο το έτος για όλες τις διευθύνσεις και όλες τις ταχύτητες, το οποίο είναι 0.37441, σύμφωνα με αποτελέσματα του κώδικα. Είναι, λοιπόν, εξαιρετικά επιτυχής η τοποθέτηση των 5 μηχανών, καθώς το CF του πάρκου τείνει να «αγγίξει» αυτό το απόλυτο νούμερο, το οποίο είναι αδύνατο να ξεπεραστεί από οποιοδήποτε πάρκο με αυτό το ρόδο ανέμου ίδιου τύπου μηχανές.

Παρακάτω θα εξεταστεί η βελτιστοποίηση τοποθέτησης 15 ανεμογεννητριών σε ορθογώνιο πάρκο, με ενεργό τμήμα διπλάσιων διαστάσεων του προηγούμενου, δηλαδή 3800m επί 1900m, με το ίδιο ρόδο ανέμου Α του Σχ.3.α.2. Δεν αναμένεται, φυσικά, η επίτευξη CF όμοιου με του πάρκου των 5 ανεμογεννητριών, καθώς στην προηγούμενη περίπτωση, ο EASY μπορούσε να κατατάξει τις ανεμογεννήτριες έτσι ώστε να έχουν αλληλεπίδραση στις διευθύνσεις χαμηλής συχνότητας και να μην έχουν καθόλου στις κύριες διευθύνσεις. Στην παρούσα περίπτωση πρέπει να βρει τη «χρυσή τομή» που θα ελαχιστοποιεί την απώλεια ισχύος στις κύριες διευθύνσεις, καθώς είναι σχεδόν βέβαιο ότι ακόμα και στην κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών θα υπάρχουν μηχανές που θα δέχονται επίδραση ομόρρου. Παρακάτω απεικονίζεται το πάρκο των 15 ανεμογεννητριών με τη βέλτιστη τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, σύμφωνα με τον EASY:



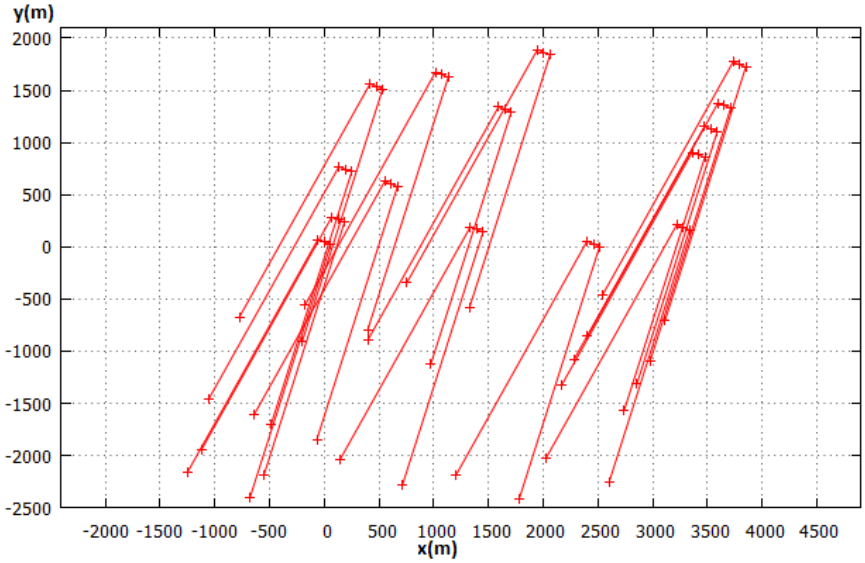
Σχ.3.α.19: Βελτιστοποιημένο πάρκο 15 ανεμογεννητριών με το ρόδο ανέμου Α.

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	x(m)	y(m)
1	193.053	743.151
2	3419.276	881.213
3	2458.415	27.397
4	1393.933	166.536
5	1.174	45.401
6	2005.479	1863.796
7	3656.164	1354.599
8	127.691	259.589
9	477.104	1537.378
10	3279.159	185.323
11	1075.930	1650.196
12	611.546	601.663
13	1651.370	1318.102
14	3793.346	1746.184
15	3533.464	1128.865

Πίν.3.α.4: Συντεταγμένες x,y των ανεμογεννητριών

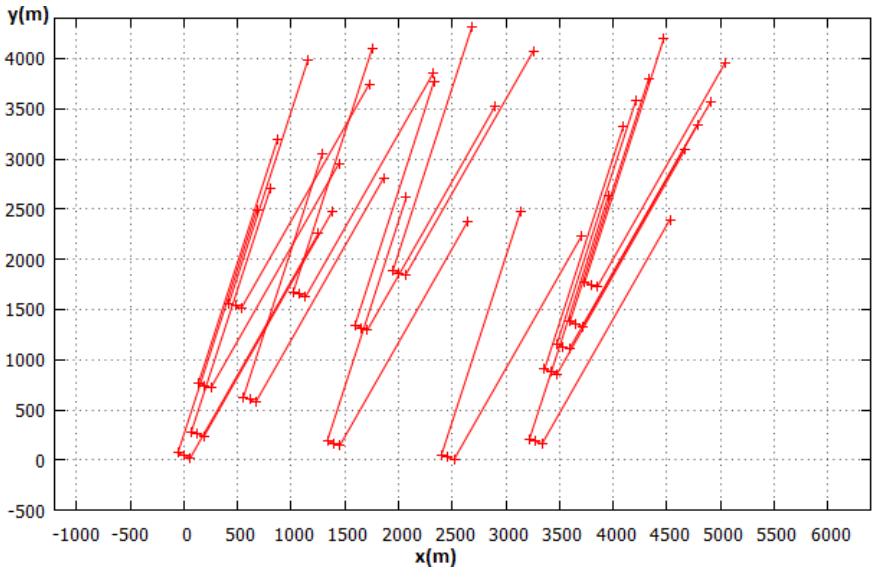
Παρατηρώντας το Σχ.3.α.19, μπορεί κανείς να δει ότι ,και σε αυτή την περίπτωση, ο EASY «προσπαθεί» να κατατάξει τις μηχανές τη μία πίσω από την άλλη στο ζευγάρι διευθύνσεων 22.5-202.5.

Ακολουθεί η απεικόνηση ομόρρου των μηχανών στις διευθύνσεις 22.5 και 202.5 μοιρών:



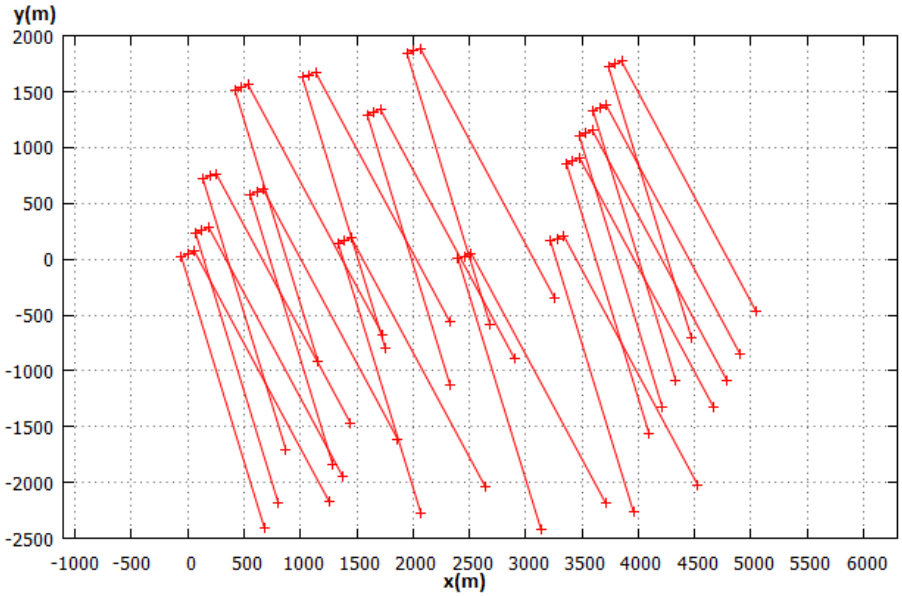
Σχ.3.α.20: Απεικόνιση ομόρρου στις 22.5°

Όπως είχε προβλεφτεί, υπάρχουν μηχανές που, αρχικά, αδικαιολόγητα θα έλεγε κανείς, δε δέχονται ομόρρου από κάποια άλλη. Σίγουρα, όμως, κερδίζεται πιο μεγάλο ποσό ενέργειας σε άλλες διευθύνσεις, από όσο χάνεται με το να μην τοποθετηθούν με ακόμα μεγαλύτερες αλληλεπιδράσεις ομόρρου των μηχανών σε αυτήν. Επίσης, παρατηρείται η διάταξη σε 4 σειρές αλληλεπίδρασης σε αυτή τη διεύθυνση, ούτως ώστε να χαθεί όσο το δυνατόν λιγότερη ισχύς, παρότι οι μηχανές είναι η μία πίσω από την άλλη. Παρόμοιο είναι το αποτέλεσμα και στις 202.5 μοίρες:



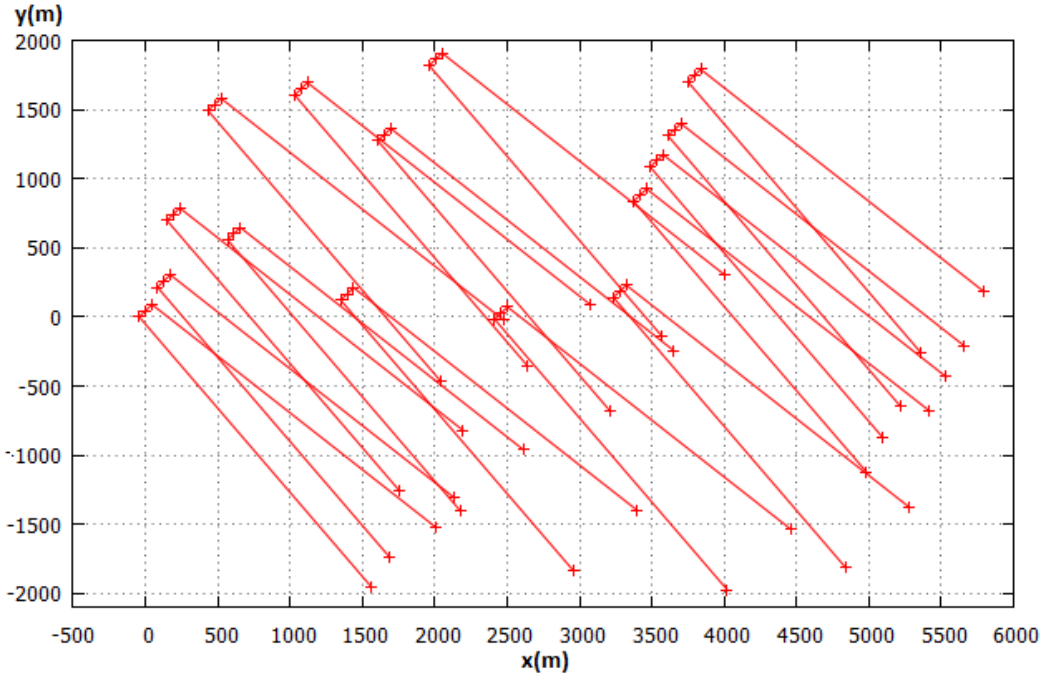
Σχ.3.α.21: Απεικόνιση ομόρρου στις 202.5°

Η ισχύς των αντίστοιχων μηχανών στις δύο διευθύνσεις είναι περίπου ίδια στις διάφορες ταχύτητες, αν κρίνει κανείς από την αλληλεπίδραση των μηχανών. Στην πρώτη περίπτωση, φαίνεται λίγο πιο φορτισμένη η τελευταία σειρά μηχανών, ενώ στη δεύτερη η πρώτη. Δεν μπορούν να συγκριθούν οι δύο διευθύνσεις, όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, διότι εκεί παίζει ρόλο το ρόδο ανέμου. Μπορούμε όμως να συγκρίνουμε τις πιο φορτισμένες μηχανές, και στις δύο περιπτώσεις και να βγάλουμε συμπεράσματα. Ενδιαφέρον έχει η ύπαρξη ή μη αλληλεπίδρασης των μηχανών στην κύρια διεύθυνση, που φαίνεται στην παρακάτω απεικόνηση:



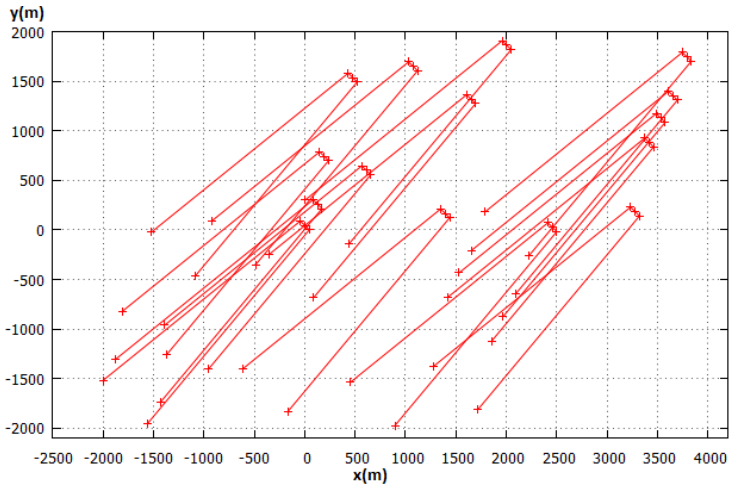
Σχ.3.α.22: Απεικόνιση ομόρρου στις 337.5^{o}

Παρότι, αρχικά, φαινόταν πολύ δύσκολο, ο EASY κατάφερε να τοποθετήσει τις μηχανές με σχεδόν μηδενική αλληλεπίδραση στη διεύθυνση των 337.5 μοιρών, αν εξαιρέσει κανείς τις μηχανές 3,4 και 12, οι οποίες, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του κώδικα, ελάχιστη επίδραση ομόρρου, με αποτέλεσμα στα 5 m/s ταχύτητα ανέμου, να δέχονται λίγο μικρότερη ταχύτητα ανέμου από 5m/s και να παράγουν μηδενική ισχύ στα 5m/s πάρκου. Παρακάτω θα δούμε κατά πόσο είναι επιτυχής η τοποθέτηση και για τη δεύτερη μεγαλύτερη διεύθυνση των 315:

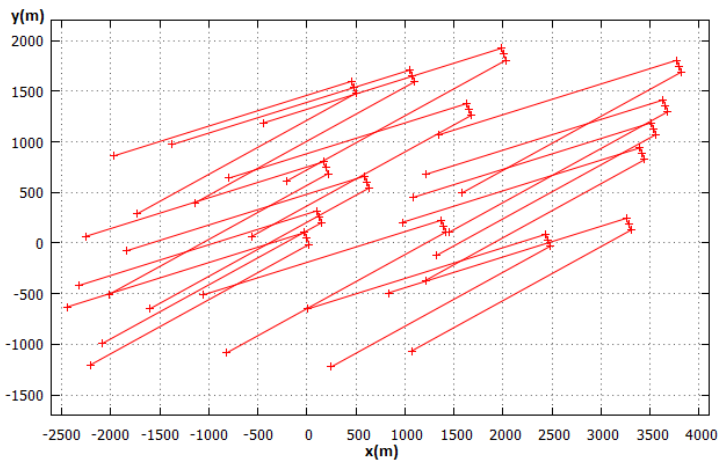


Σχ.3.α.23: Απεικόνιση ομόρρου στις 315°

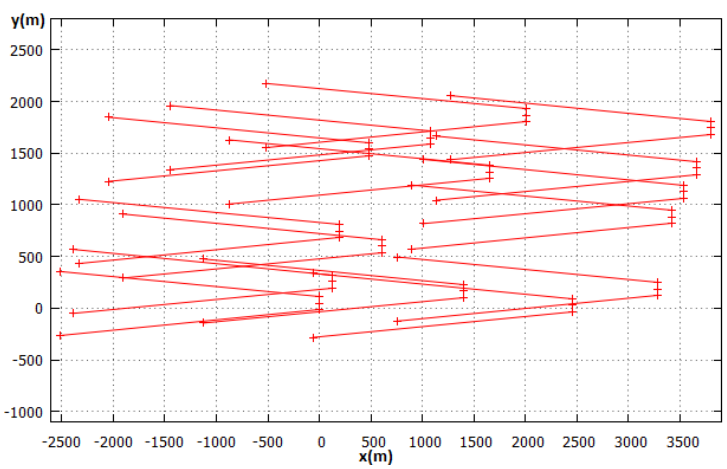
Πάλι υπάρχει μια μικρή επίδραση ομόρρου σε κάποιες μηχανές, αλλά το αποτέλεσμα είναι αρκετά ικανοποιητικό. Ανατρέχοντας στο Σχ.3.α.19, είναι φανερό ότι οι διευθύνσεις των 45, 67.5, 90 και 112.5 μοιρών δεν έχουν την επιτυχία των παραπάνω δύο σε απώλεια ομόρρου. Με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, αυτό φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:


y(m)
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500 -2000 -1500 -1000 -500 0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000
x(m)

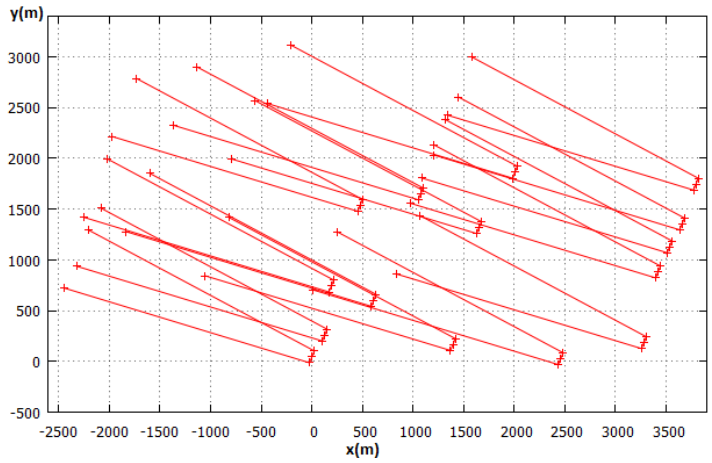
45°


y(m)
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2500 -2000 -1500 -1000 -500 0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000
x(m)

67.5°


y(m)
2500
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-2500 -2000 -1500 -1000 -500 0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500
x(m)

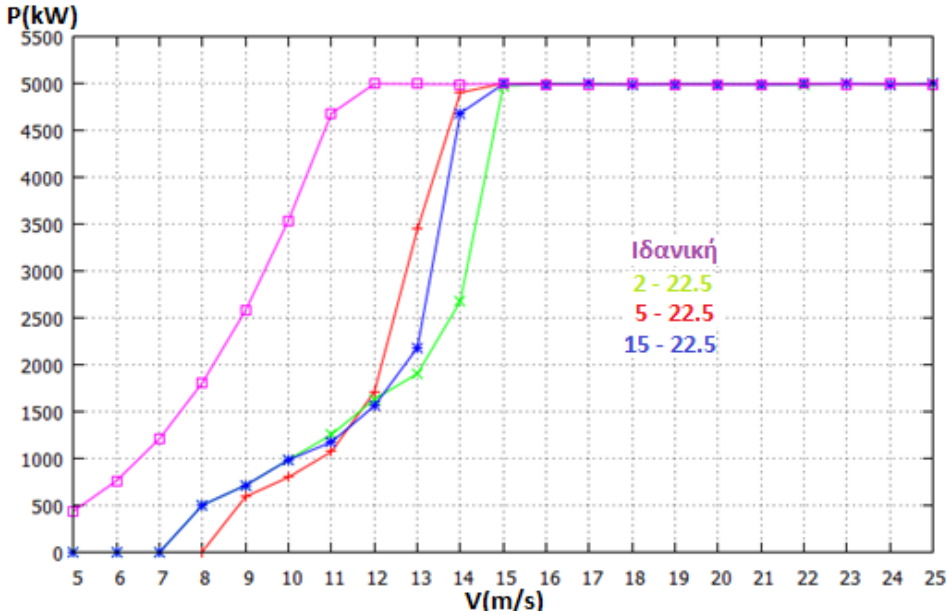
90°



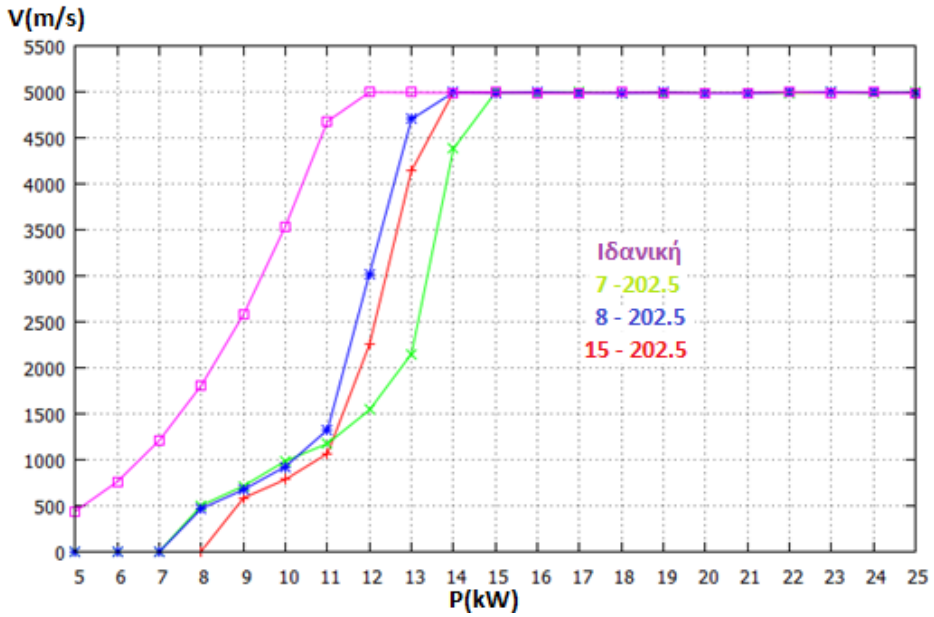
112.5^{o}

Σχ.3.α.24: Απεικόνιση ομόρρου στις 45°, 67.5^{o}, 90° και 112.5^{o}

Παρακάτω, για να γίνει σαφέστερος ο βαθμός αλληλεπίδρασης ομόρρου μεταξύ των μηχανών στις διάφορες κατευθύνσεις, παρεμβάλονται διαγράμματα ισχύος των μηχανών. Αρχικά, θα παρεμβληθούν τα διαγράμματα των τριών πιο φορτισμένων ανεμογεννητριών 2, 5 και 15, σύμφωνα με αποτελέσματα του κώδικα, σε σχέση με την ιδανική καμπύλη ισχύος, για τις διευθύνσεις των 22.5 και 202.5 μοιρών:



Σχ.3.α.25: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 2, 5 και 15 στις 22.5^{o}.



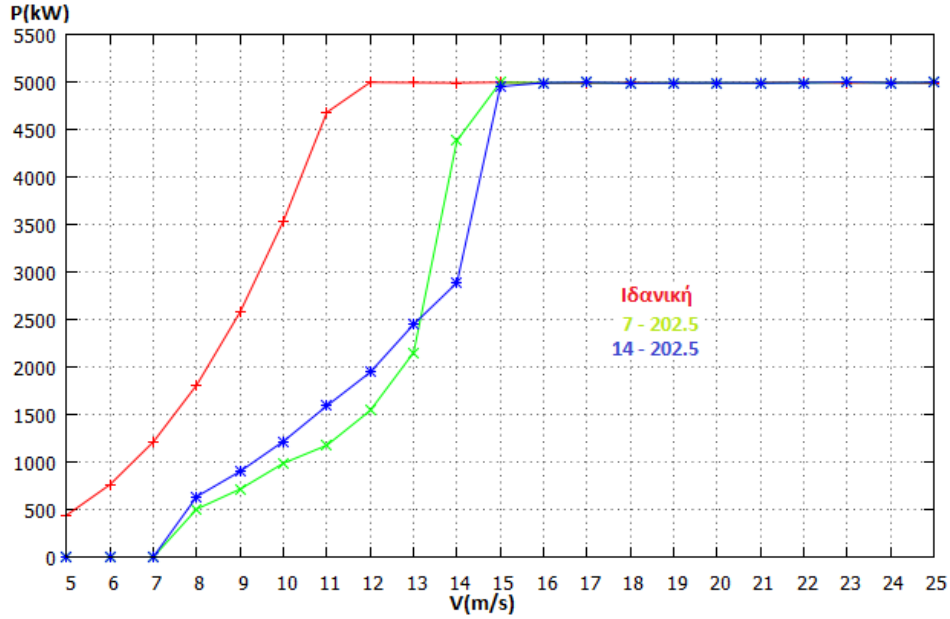
Σχ.3.α.26: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 7, 8 και 15 στις 202.5^{o}.

Σχετικά με τη διεύθυνση των 22.5 μοιρών, όλες οι μηχανές δέχονται πολλαπλό ομόρρου. Η μηχανή 5 δέχεται τριπλό ομόρρου, από τις 8,1 και 9, η 2 τριπλό από τις 14, 7 και 15, και η μηχανή 15 διπλό ομόρρου από τις 14 και 7. Η μικρότερη απόσταση είναι αυτή των μηχανών 5 και 8, και η 5 βρίσκεται ακριβώς πάνω στην κεντρική γραμμή του ομόρρου της 8. Επίσης, δέχεται σε πολύ μικρό βαθμό ομόρρου από τις 1 και 9, καθώς είναι πολύ μακριά και μη συνευθειακά με αυτές. Αντίθετα, οι μηχανές 2 και 15, δεν έχουν αρκετά μικρή απόσταση από τις 15 και7, αντίστοιχα, βρίσκονται πάνω στην κεντρική γραμμή του ομόρρου τους, αλλά είναι και κοντά και συνευθειακά τοποθετημένες με όλες τις μηχανές που επιδρούν πάνω τους. Για όλους αυτούς τους λόγους, και σύμφωνα με το μοντέλο ομόρρου Abramovich και το μοντέλο αλληλεπίδρασης, η μηχανή 5 έχει τη χαμηλότερη απόδοση σε ισχύ από όλες τις μηχανές, για ταχύτητες ανέμου μέχρι και 11m/s, και επειδή δέχεται, ουσιαστικά, απλό ομόρρου σε σχέση με τις άλλες δύο, τις ξεπερνά με διαφορά σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Αυτό συμβαίνει γιατί σε μία σειρά μηχανών, το μεγαλύτερο συνολικό έλλειμα ταχύτητας δέχεται η πρώτη μηχανή στην οποία επιδρά διαταραγμένη ροή αέρα σε μικρές ταχύτητες ανέμου, καθώς στις πίσω το έλλειμα μειώνεται, ενώ για μεγάλες ταχύτητες ανέμου, το έλλειμα ταχύτητας είναι ακόμα εντονότερο, όσο πιο πίσω βρίσκεται η μηχανή. Σύμφωνα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, λοιπόν, η μηχανή 2, επειδή δέχεται τον εντονότερο πολλαπλό ομόρρου, για ταχύτητες ανέμου μέχρι και 11m/s είναι πρώτη εκ των τριών, και για τον ίδιο λόγο, μετά τα 12m/s αποδίδει μικρότερη ισχύ τις άλλες. Τέλος, η μηχανή 15, επειδή δέχεται πολλαπλό ομόρρου ενδιάμεσης έντασης σε σχέση με τις 5 και 2, παράγει σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων ανέμου ενδιάμεση ισχύ, σε σχέση με τις άλλες.

Όσο για τις 202.5 μοίρες, η μηχανή 8 δέχεται απλό ομόρρου από την 5, η 15 διπλό από τις 10 και 2 ενώ η 7 τριπλό από τις 10, 2 και 15. Η μηχανή 8, παρότι δέχεται απλό ομόρρου, αποδίδει περισσότερο στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου από τη 15, διότι, αν και έχουν παραπλήσιες αποστάσεις από τις 8 και 2 αντίστοιχα, η 15 βρίσκεται ακριβώς πάνω στην κεντρική γραμμή του ομόρρου. Εκτός αυτού, η 15 δέχεται αρκετά εξασθενημένο διπλό ομόρρου, καθώς δέχεται ελάχιστα την επίδραση της μηχανής 10. Ως εκ τούτου, θεωρώντας ότι, ουσιαστικά, δέχεται και αυτή απλό ομόρρου, είναι λογικό που αποδίδει λιγότερο στις μικρές ταχύτητες από την 8, πόσο μάλλον στις μεγάλες ταχύτητες, όπου επιβαρύνεται και από τη μικρή, αλλά υπαρκτή επίδραση της 10. Όσον αφορά τη μηχανή 7, αυτή δέχεται πραγματικά πολλαπλό ομόρρου, καθότι, έχει και μία μικρή επίδραση από τη 10, αλλά έχει τεράστια επίδραση από τις 2 και 15, καθώς η απόστασή της από τη 15 είναι πολύ μικρή, όπως και της 15 από τη 2, και είναι συνευθειακά τοποθετημένες. Οπότε, με υπακούοντας στο μοντέλο αλληλεπίδρασης, η μηχανή αποδίδει καλύτερα από τις άλλες δύο μέχρι τα 10m/s ανέμου, αλλά από τα 11m/s και άνω, η απόδοση είναι δραματικά χαμηλή.

Θα μπορούσε να είχε επιλεγεί ως μία από τις πιο φορτισμένες μηχανές και η μηχανή που δέχεται επίδραση από την 7, δηλαδή η 14 για τη διεύθυνση των 202.5 μοιρών, η οποία δέχεται τετραπλό ομόρρου από τις μηχανές 10, 2, 15 και 7, και μάλιστα, με τις τρεις τελευταίες είναι σε πολύ μικρή απόσταση και στην ίδια ευθεία. Αναμένεται, λοιπόν, εξαιρετικά χαμηλή απόδοση ισχύος για τις μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου.

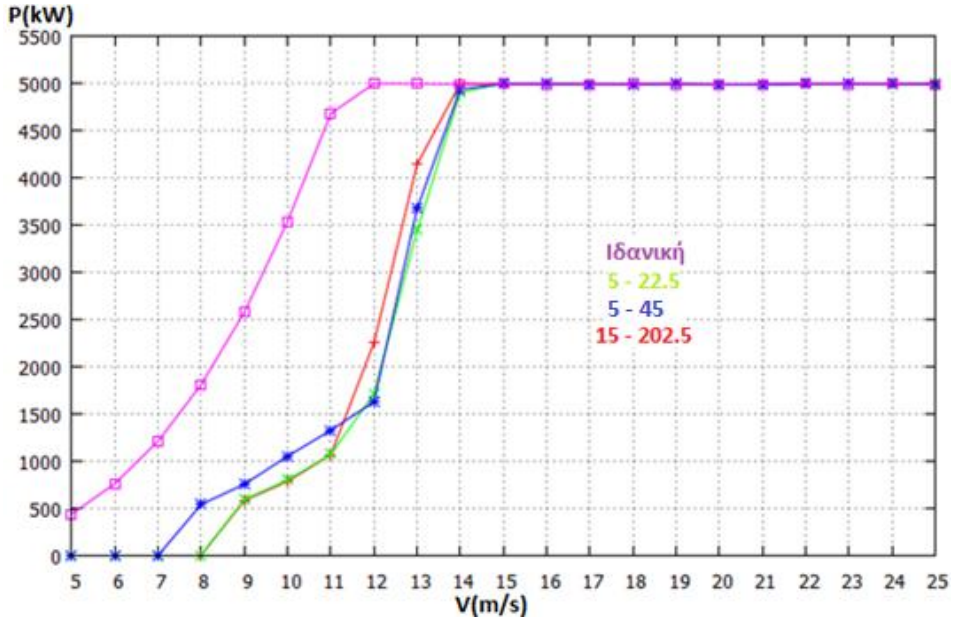
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η απεικόνηση ισχύος της συγκριτικά με τη μηχανή 7 και με την ιδανική καμπύλη ισχύος:



Σχ.3.α.27: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 7 και 14 στις 202.5^{o}

Όπως είναι λογικό, το παραπάνω Σχ.3.α.27 συμφωνεί απόλυτα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης.

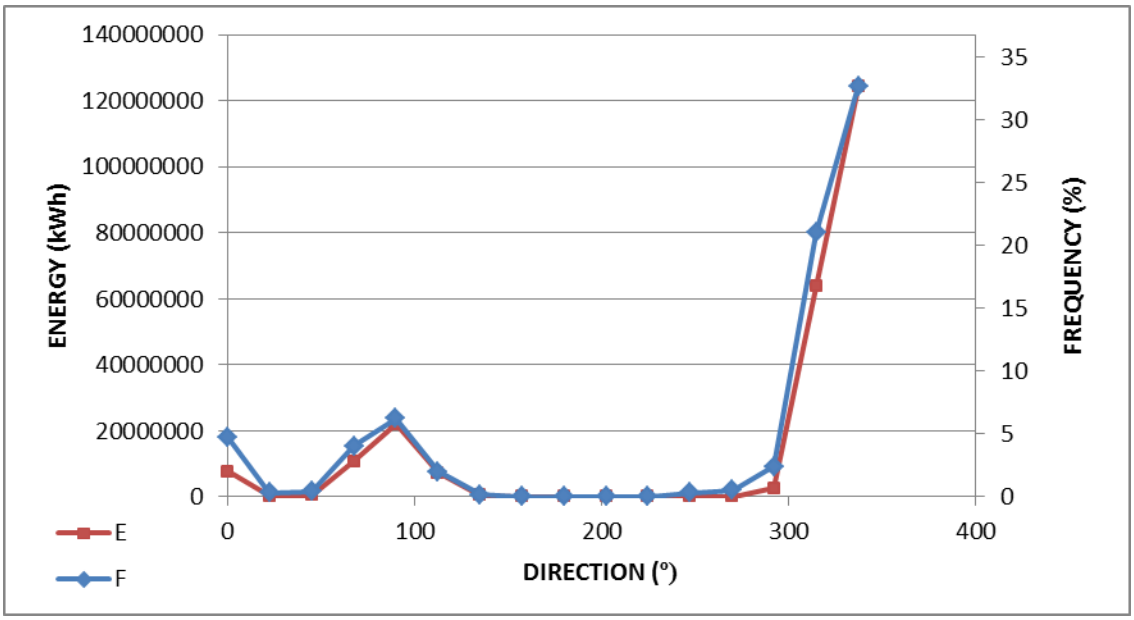
Τέλος, θα συγκριθεί η ισχύς της πιο φορτισμένης μηχανής από τις διευθύνσεις 45, 67.5, 90, 112.5, δηλαδή της μηχανής 5 στις 45 μοίρες, με τις μηχανές 5 και 15 από τις 22.5 και 202.5 μοίρες, αντίστοιχα:



Σχ.3.α.28: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 5 στις 22.5^{o} και 45° και της μηχανής 15 στις 202.5^{o}

Συγκρινόμενο με το αντίστοιχο διάγραμμα των 5 ανεμογεννητριών, είναι φανερό ότι, αναγκαστικά, στις 15, υπάρχουν έντονες αλληλεπιδράσεις ομόρρου των μηχανών, όχι μόνο στο ζευγάρι ελάχιστης συχνότητας 22.5-202.5, αλλά και σε άλλες διευθύνσεις.

Ακολουθεί διάγραμμα που υποδεικνύει τις σημαντικότερες διευθύνσεις για την παραγωγή ενέργειας με τις αντίστοιχές τους συχνότητες ανέμου:



Σχ.3.α.29: Καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων κα παραγωγής ενέργειας για την κάθε Διεύθυνση

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες με τις τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας και τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας:

DIRECTION (°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)
337.5	32.69	124249847.3
315	21.028	63794762.1
90	6.248	21971049.13

Πίν.3.α.5: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας

DIRECTION (°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)/FREQUENCY (%)
337.5	32.69	3800851.86
112.5	2.017	3618866.023
90	6.248	3516493.139

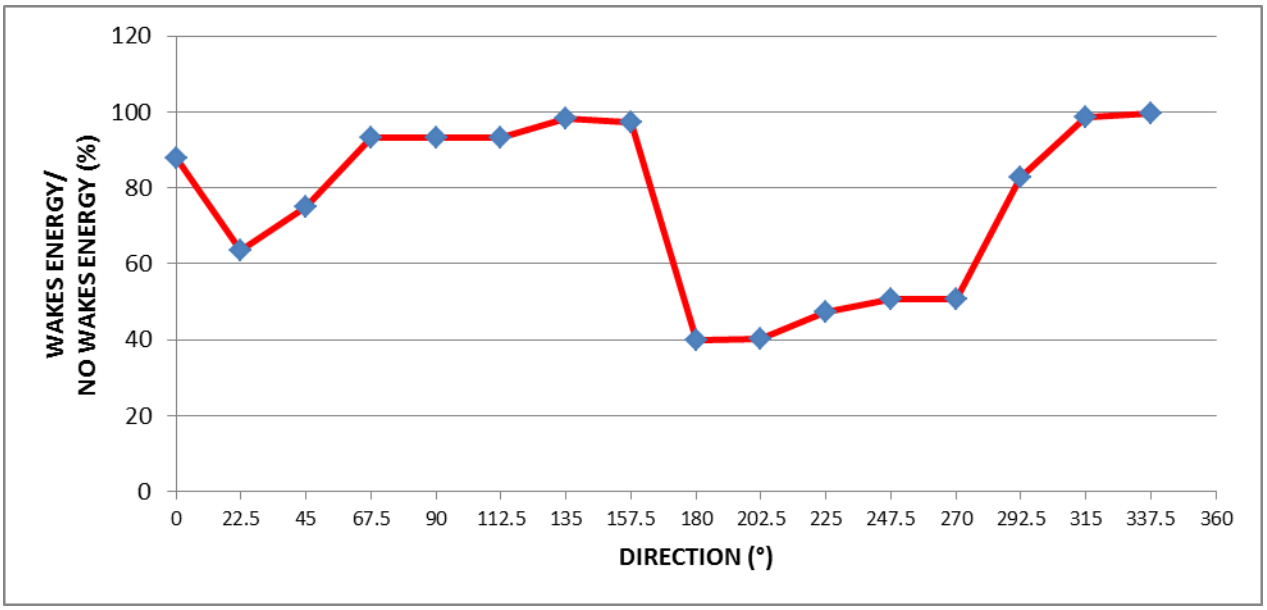
Πίν.3.α.6: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας.

Όπως φαίνεται από τον Πίν.3.α.5, οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας, είναι και οι 3 διευθύνσεις με τις μεγαλύτερες συχνότητες ανέμου. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για την παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας, όπως φαίνεται από τον Πίν.3.α.6. Παρατηρώντας τον αντίστοιχο του Πιν.3.α.6 για το πάρκο των 5 μηχανών, δηλαδή τον Πίν.3.α.3, η διεύθυνση των 112.5 εκεί, ήταν πρώτη και από τη διεύθυνση των 337.5 μοιρών. Εδώ, όμως, δεν είναι, και αυτό δείχνει πόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του ομόρρου των

μηχανών στις 112.5 μοίρες, από ότι στις 337.5 μοίρες, πλέον, που είναι και το σωστό, καθότι η διεύθυνση των 337.5 μοιρών έχει 15πλάσια συχνότητα ανέμου.

Εδώ, σύμφωνα με αποτελέσματα του κώδικα η αναλογία παραγωγής ενέργειας των κύριων διευθύνσεων 337.5 και 315 μοιρών, είναι 124249847/63794762=1.94765.>1.92912, που ήταν στο πάρκο με τις 5 μηχανές. Άρα, συμπεραίνεται ξεκάθαρα ότι οι, εδώ, οι μηχανές στις 315 μοίρες δέχονται μεγαλυτερο ομόρρου από ότι στις 337.5. Όπως φαίνεται, όσο μεγαλώνει ο αριθμός των μηχανών, τόσο πιο πολύπλοκη και δύσκολη γίνεται η υπόθεση της τοποθέτησής τους. Στις 5 μηχανές, η πρόθεση του EASY ήταν εμφανής, αλλά και στις 15, «προσπάθησε» να υλοποιήσει τον ίδιο σκοπό με αρκετή έως και μεγάλη επιτυχία. Στο χωράφι των 40 ανεμογεννητριών, η ανάλυση του οποίου ακολουθεί, η υπόθεση δυσκολεύει ιδιαίτερα.

Αξίζει η παρεμβολή του διαγράμματος με τα ποσοστά ενέργειας των διευθύνσεων προς αυτά που θα παρήγαγαν αν δεν υπήρχαν αλληλεπιδράσεις.



Σχ.3.α.30: Ποσοστό % παραγωγής ενέργειας προς αυτό που θα παραγόταν χωρίς αλληλεπιδράσεις σε κάθε διεύθυνση

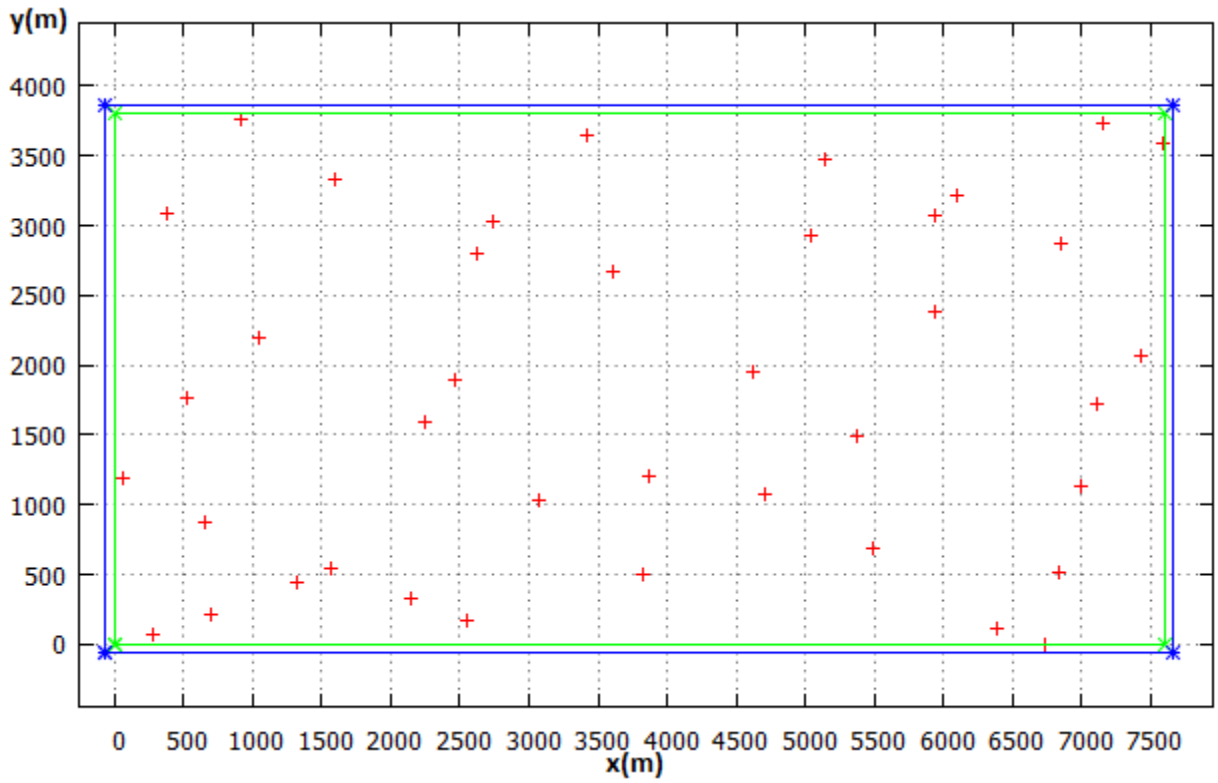
Και εδώ, φαίνεται ότι υπάρχουν πλέον μεγάλες απώλειες ενέργειας και σε άλλες διευθύνσεις. Το ζευγάρι διευθύνσεων 22.5 – 202.5 εξακολουθεί να έχει το μεγαλύτερο αθροιστικό ποσοστό απώλειας ενέργειας. Μεμονομένα, τις μεγαλύτερες ποσοστιαίες απώλειες φαίνεται να έχει η διεύθυνση των 180 μοιρών. Ωστόσο, αυτό δε συμβαίνει επειδή υπάρχουν μεγάλες αλληλεπιδράσεις ομόρρων σε αυτή τη διεύθυνση, αλλά γιατί, από τα ακριβή νούμερα του ρόδου, οι 180 είναι η μοναδική διεύθυνση που έχει μη μηδενική συχνότητα ανέμου μόνο στην ταχύτητα των 5m/s. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα και με ελάχιστο έλλειμα ταχύτητας, δηλαδή ελάχιστο ομόρρου, να μηδενίζεται η παραγόμενη ισχύς στα 5m/s, άρα και η

παραγόμενη ενέργεια, όχι μόνο στα 5m/s, αλλά και η συνολική, καθώς μόνο σε αυτή την ταχύτητα υπάρχει παραγωγή. Άρα σε αυτή τη διεύθυνση, η ετησίως παραγόμενη ενέργεια από μία μηχανή είναι ή 0, ή, με μηδενικό ομόρρου, η παραγόμενη ισχύς των 442 kW επί τη συχνότητα (όχι % συχνότητα, την κανονική) επί τις 8760h του έτους. Για αυτό το λόγο αυτό, από το ποσοστό 40% για τη διεύθυνση αυτή, βγαίνει το συμπέρασμα ότι 40%, είναι και το ποσοστό των μηχανών που δεν δέχονται ομόρρου, άρα 40% · 15 = 6 μηχανές δεν δέχονται επίδραση και, άρα, αποδίδουν ενέργεια. Παρόμοιος είναι και ο λόγος που, ενώ οι 337.5 έχουν μικρότερη απώλεια ενέργειας από τις 315, οι, αντίστοιχα, «απέναντί» τους, 157.5 έχουν λίγο μεγαλύτερη απώλεια από τις 135.

Ως εκ τούτου, ούτε αυτό το διάγραμμα μπορεί να απαντήσει καθαρά στο ποια διεύθυνση δέχεται μεγαλύτερη επίδραση. Για να επιτευχθεί αυτό, ο σίγουρος τρόπος είναι η άθροιση των ισχύων όλων των μηχανών σε όλες τις ταχύτητες για την κάθε διεύθυνση, χωρίς να εμπλέκονται οι συχνότητες του ρόδου στους υπολογισμούς. Είναι, όμως, ένα αποτέλεσμα χωρίς ουσία.

Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας ΑΕΠ στο χωράφι των 15 ανεμογεννητριών με το ρόδο ανέμου Α, για όλες τις διευθύνσεις και ταχύτητες ανέμου και για όλες τις μηχανές, με τις συντεταγμένες που επιλέχθηκαν από τον EASY, ανέρχεται στις 239547456 kWh, με CF_{2A}=0.36461 < CF_{1A} , όπως ήταν αναμενόμενο, αφού έχει τριπλάσιο αριθμό ανεμογεννητριών, και, άρα, οι επιδράσεις ομόρρου μεταξύ των μηχανών μεγαλύτερες, άρα και η απώλεια ισχύος. Έτσι, το CF απομακρύνεται κι άλλο από το βέλτιστο 0.37441.

Παρακάτω παρουσιάζεται το βελτιστοποιημένο αοιλικό πάρκο των 40 ανεμογεννητριών, ενεργών διαστάσεων 7600m επί 3800m, με το ρόδο ανέμου Α του Σχ.3.α.2:



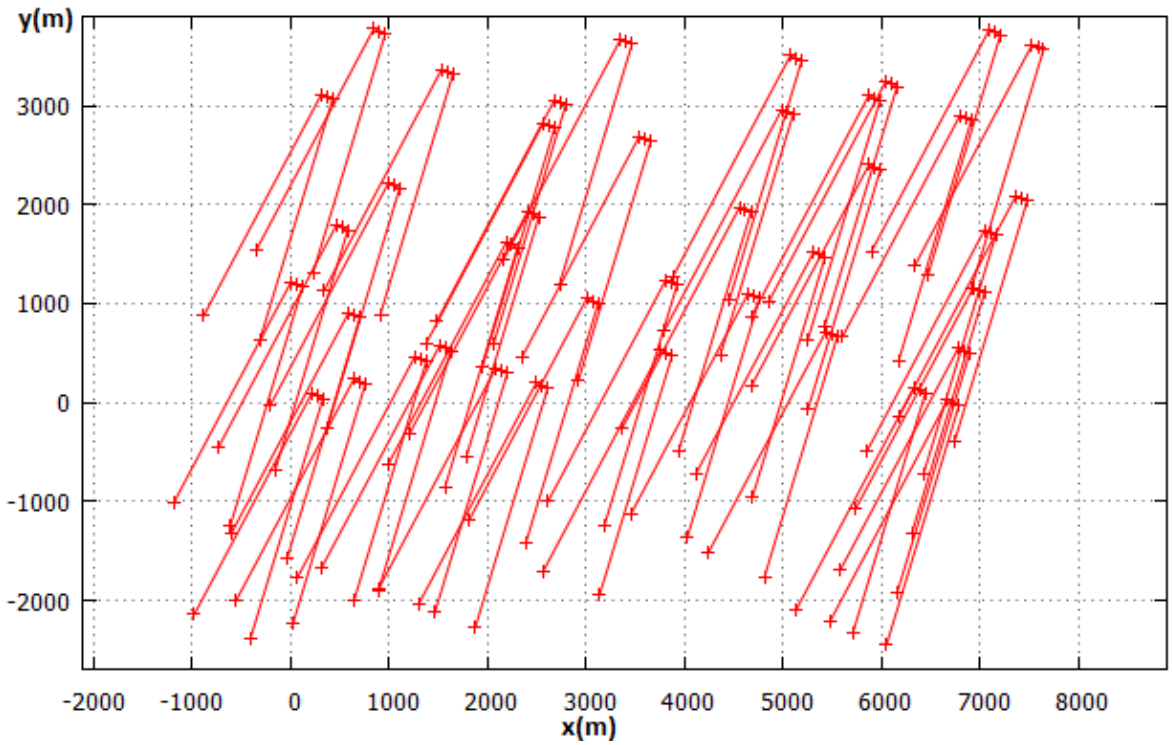
Σχ.3.α.31: Βελτιστοποιημένο πάρκο 40 ανεμογεννητριών με ρόδο ανέμου Α

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	x(m)	y(m)
1	68.144	1195.980
2	274.918	62.906
3	372.592	3086.110
4	526.625	1764.940
5	649.295	879.157
6	704.818	211.504
7	908.957	3755.930
8	1052.740	2188.290
9	1323.960	438.248
10	1573.440	544.885
11	1592.350	3336.710
12	2146.650	322.405
13	2249.600	1590.600
14	2466.140	1900.580
15	2557.380	173.839
16	2626.630	2798.440
17	2739.700	3029.530

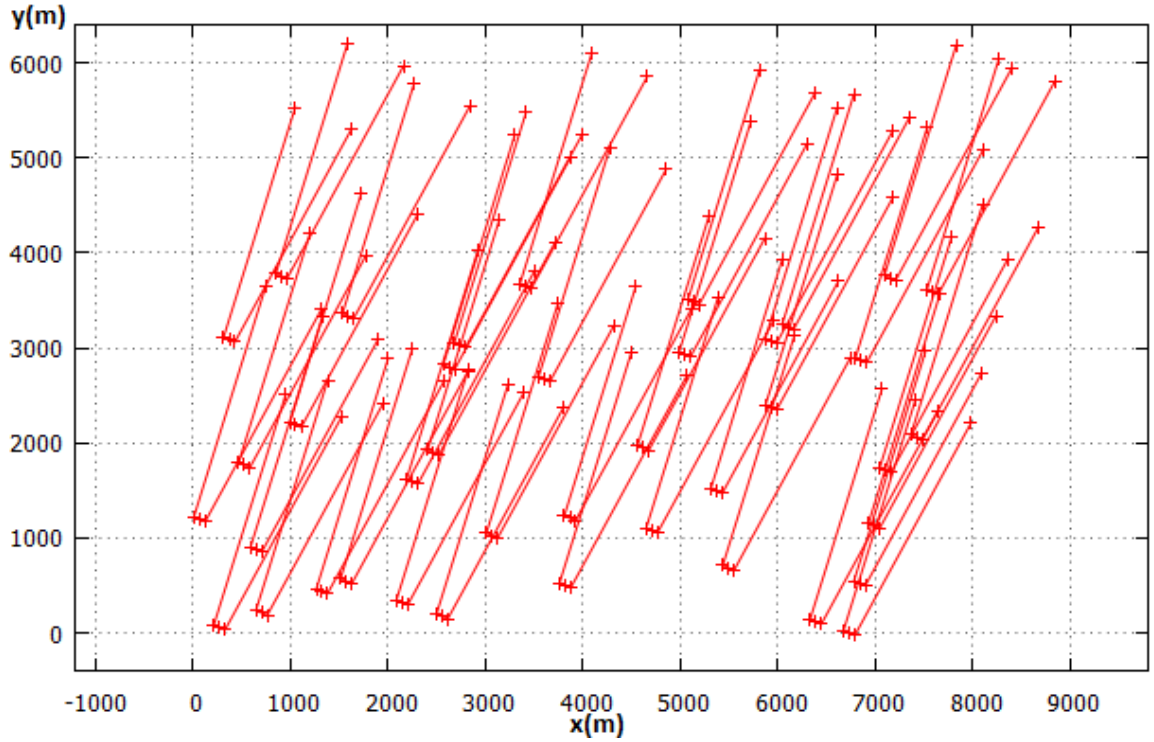
18	3069.240	1025.170
19	3412.960	3647.410
20	3603.610	2666.760
21	3820.570	503.831
22	3868.220	1206.860
23	4619.510	1947.350
24	4707.970	1076.360
25	5046.480	2929.940
26	5135.980	3480.320
27	5371.270	1491.280
28	5494.480	685.257
29	5930.980	3074.640
30	5934.840	2378.420
31	6103.510	3218.200
32	6391.330	119.158
33	6733.640	0.188
34	6840.100	521.411
35	6856.010	2870.890
36	6990.040	1129.280
37	7105.520	1715.700
38	7153.530	3738.570
39	7425.240	2061.040
40	7590.000	3589.780

Πίν.3.α.7: Συντεταγμένες x,y των ανεμογεννητριών

Πλέον, με τόσο μεγάλο αριθμό μηχανών, δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα από το παραπάνω σχήμα για το αν ο EASY έχει κατατάξει τις μηχανές ώστε να αλληλεπιδρούν στις 22.5-202.5 και να μην αλληλεπιδρούν στις 337.5. Οπότε, θα παρεμβληθούν οι απεικονήσεις ομόρρου, αρχικά για 22.5 και 202.5:



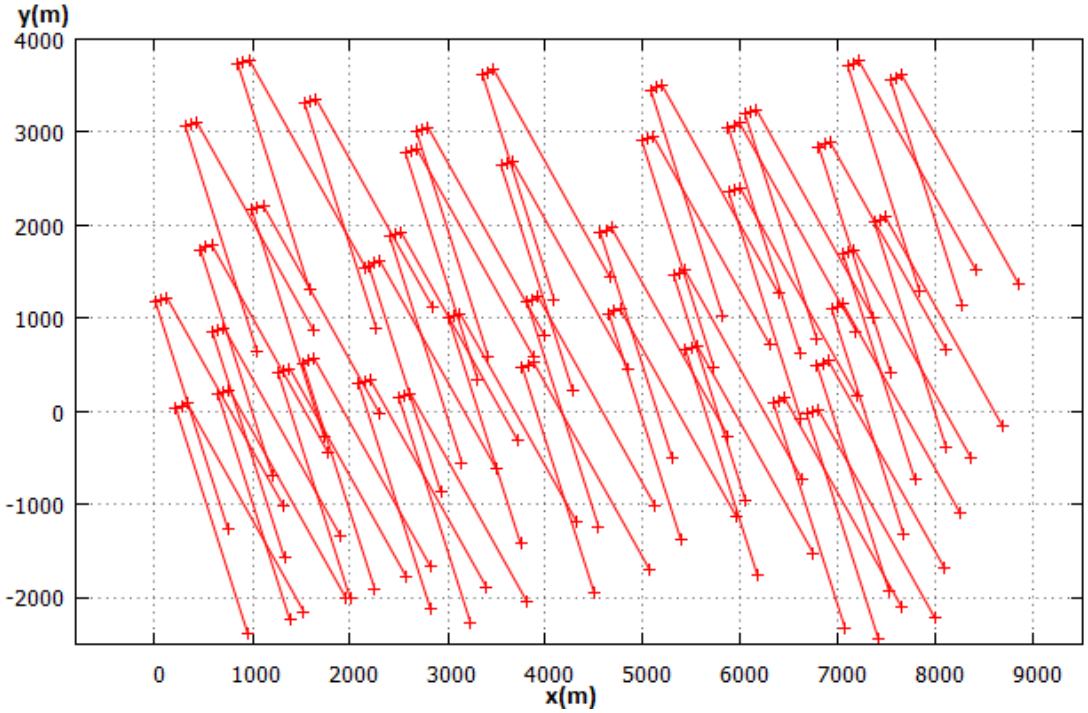
Σχ.3.α.32: Απεικόνιση ομόρρου στις 22.5^{o}



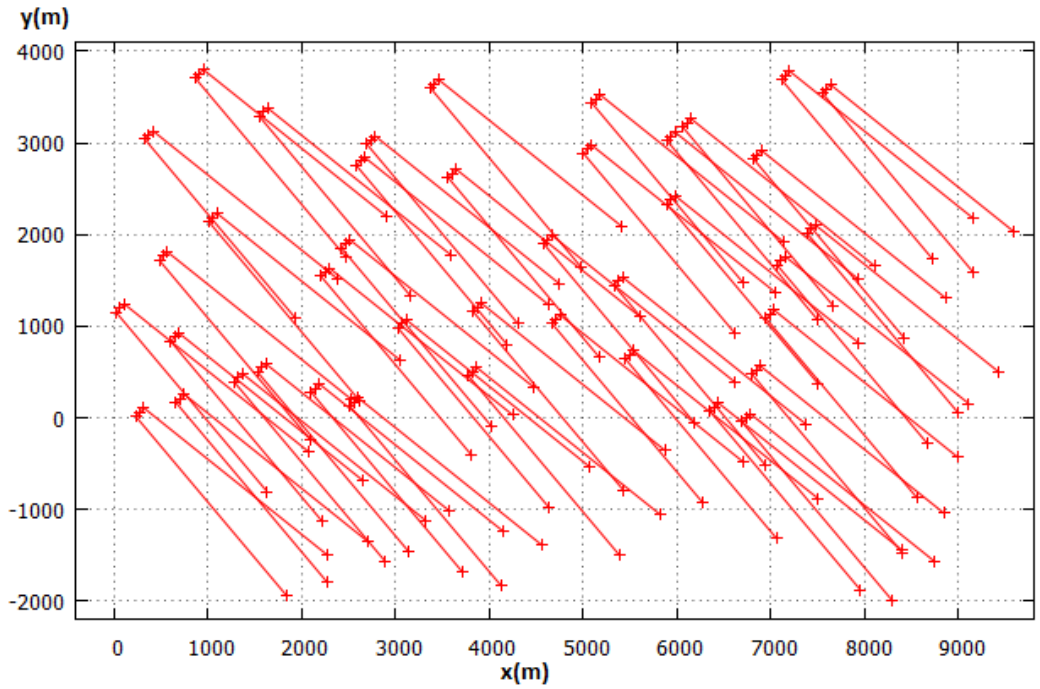
Σχ.3.α.33: Απεικόνιση ομόρρου στις 202.5^{o}

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό και, ότι, αν με τις 15 ανεμογεννήτριες υπήρχαν κάποιες μηχανές που δεν δέχονται επίδραση ομόρρου στις δύο αυτές διευθύνσεις, στις 40 το φαινόμενο αυτό είναι ακόμα πιο έντονο. Οφείλεται, εν μέρει, στις μικρές διαστάσεις του χωραφιού για τόσο μεγάλο αριθμό μηχανών, αλλά και σε επιλογή του EASY, διότι μία πιο κερδοφόρα, από άποψη ενέργειας, διάταξη σε αυτές τις διευθύνσεις, θα επιφέρει πολύ μεγαλύτερη ζημιά σε άλλες, με αποτέλεσμα μία συνολική μείωση ενέργειας.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απεικόνιση ομόρρου στην κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών, καθώς και στη δεύτερη κυριότερη των 315:

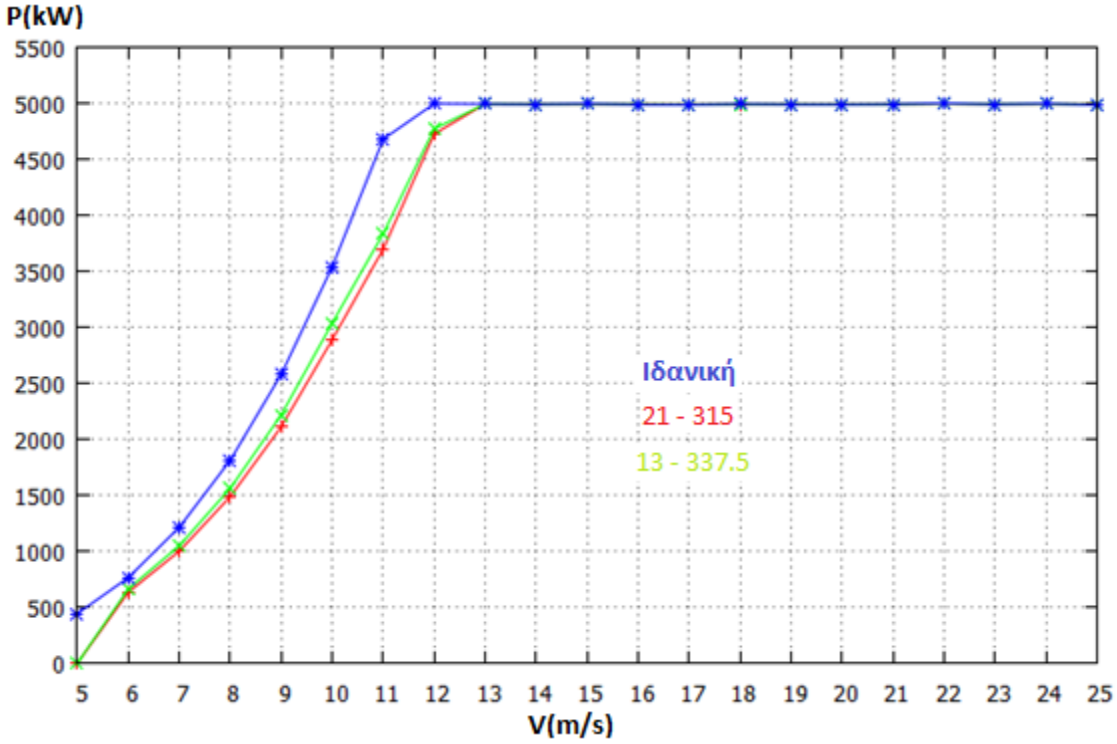


Σχ.3.α.34: Απεικόνιση ομόρρου στις 337.5^{o}



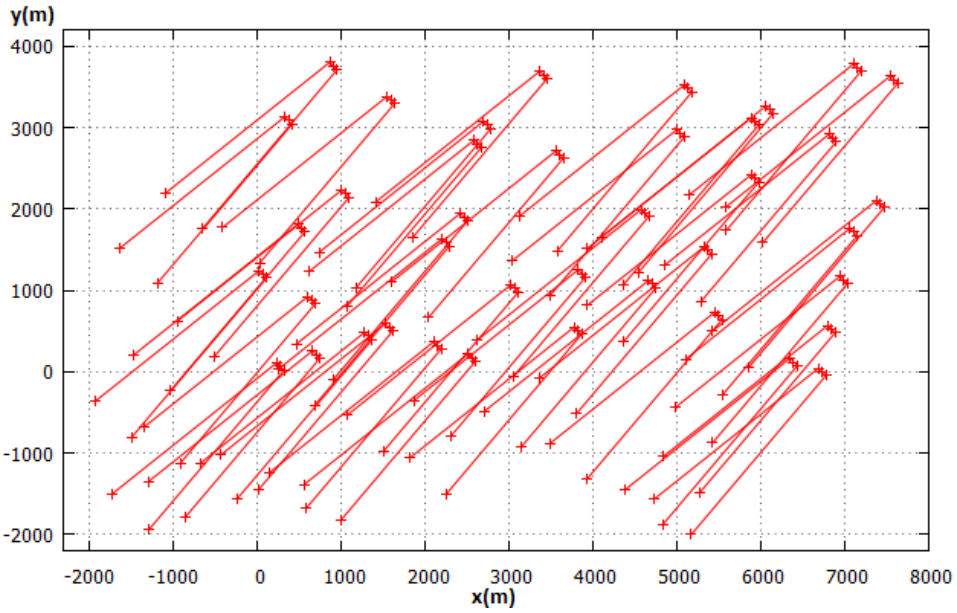
Σχ.3.α.35: Απεικόνιση ομόρρου στις 315°

Είναι εύκολο να καταλάβει, κανείς, από τα σχήματα, ότι υπάρχει εμφανής αλληλεπίδραση στις 337.5 μοίρες, και, βέβαια, ακόμα μεγαλύτερη στις 315, καθώς από τις 40 μηχανές, οι 24 δέχονται άνεμο ταχύτητας μικρότερης της ταχύτητας πάρκου, και στις δύο διευθύνσεις (σύμφωνα με αποτελέσματα του κώδικα). Βέβαια, το τελευταίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι αλληλεπιδράσεις είναι αρκετά μικρές, καθώς όλες οι μηχανές που δέχονται ομόρρου, αποδίδουν μηδενική ισχύ στα 5m/s πάρκου, ενώ σε ταχύτητες από 6m/s και άνω, η ισχύς είναι πολύ κοντά στην ισχύ αναφοράς. Παρακάτω παρεμβάλονται οι πιο φορτισμένες μηχανές, η μηχανή 21 στις 315 και η μηχανή 13 στις 337.5 μοίρες, σε σχέση με την καμπύλη αναφοράς:

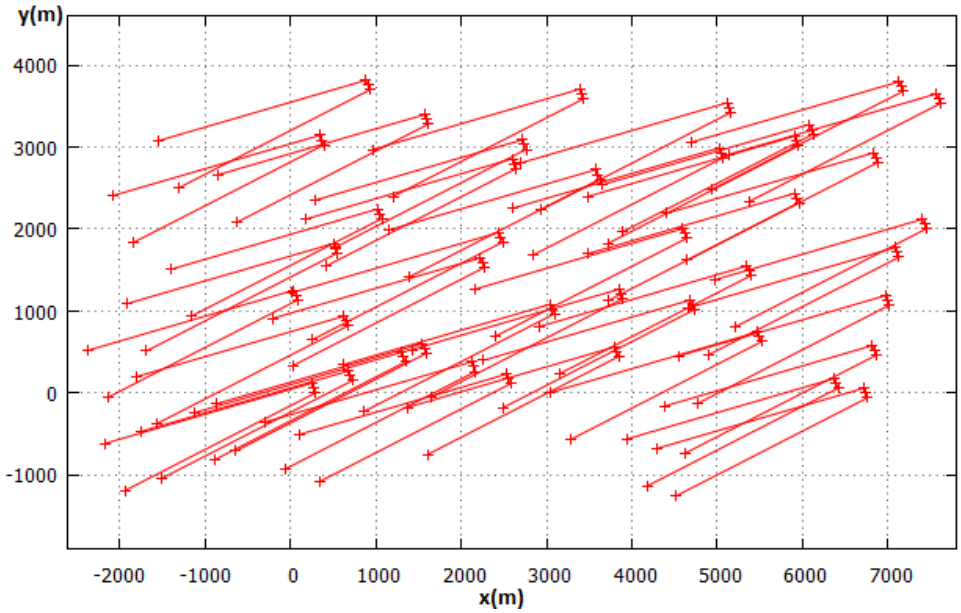


Σχ.3.α.36: Καμπύλες ισχύος της μηχανής 13 στις 337.5^{o} και της μηχανής 21 στις 315°.

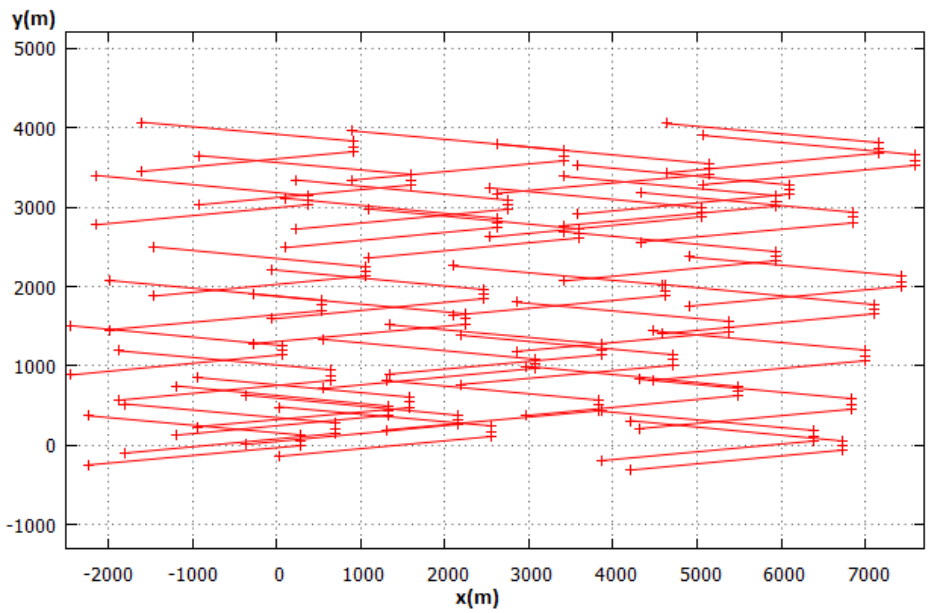
Ακολουθούν οι απεικονήσεις ομόρρου στις 45, 67.5, 90 και 112.5 μοίρες:



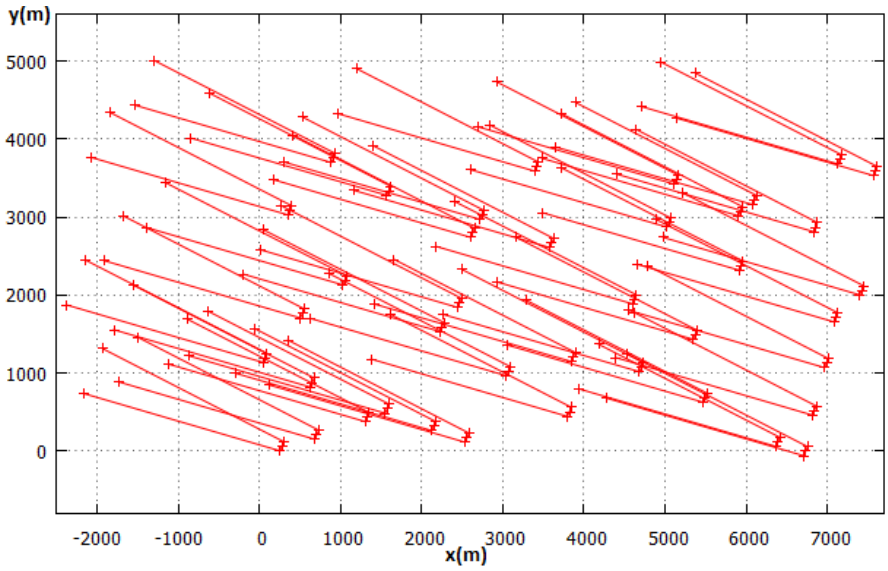
45°


y(m)
4000
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-1000
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
x(m)

67.5°


y(m)
5000
4000
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
-1000
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
x(m)

90°

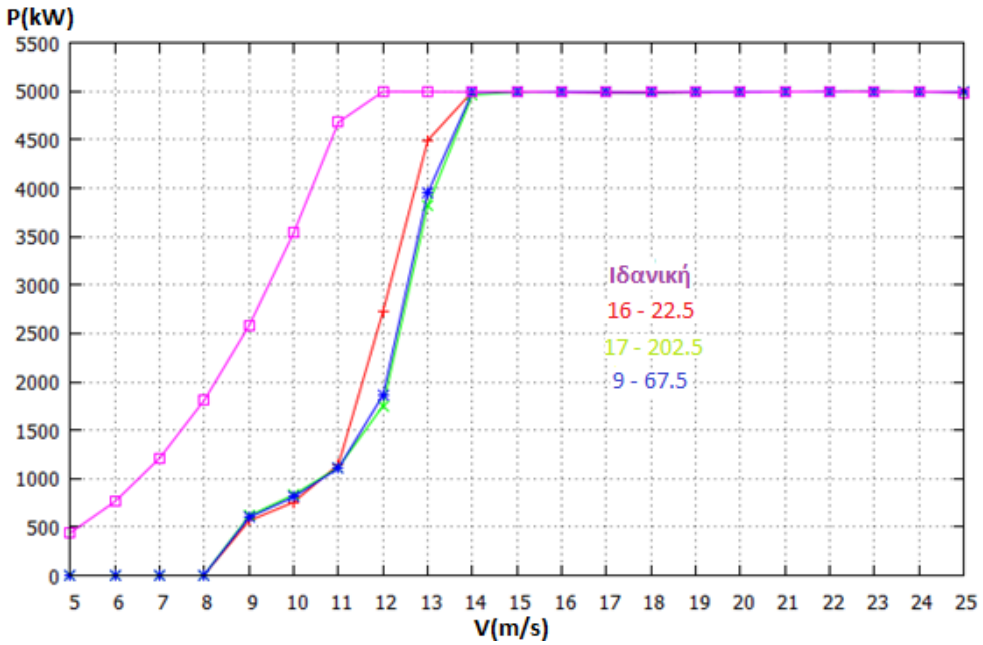


112.5^{o}

Σχ.3.α.37: Απεικονίσεις ομόρρου στις 45°, 67.5^{o}, 90° και 112.5^{o}

Είναι αναπόφευκτο οι αλληλεπιδράσεις να είναι τόσο μεγάλες και στις 4 αυτές διευθύνσεις, λόγω του μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών ένα χωράφι τέτοιου μεγέθους. Είναι, λοιπόν, εμφανές, οτι, μεχρι και στην περίπτωση των 40 μηχανών, ο EASY «επεδίωξε» να χάσει την ελάχιστη δυνατή ισχύ στις κύριες διευθύνσεις.

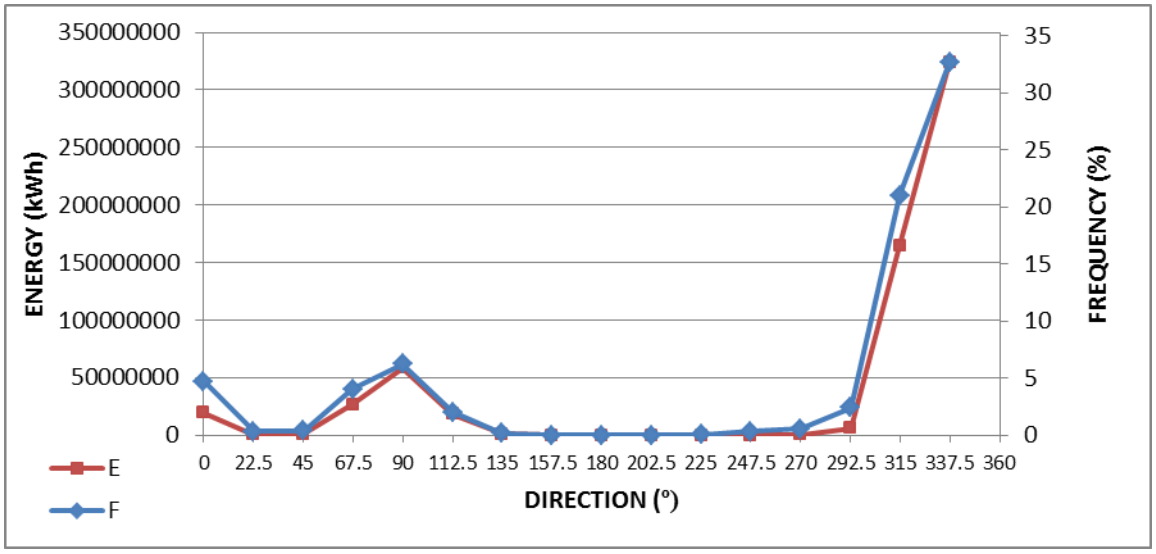
Σχεδιάζοντας τις καμπύλες ισχύος των πιομ φορτισμένων μηχανών, δεν μπορεί να γίνει αντιληπτό ποια διεύθυνση «διάλεξε» ο EASY για να αλληλεπιδρούν οι μηχανές, καθώς σε όλα τα ζευγάρια διευθύνσεων πλην των κυρίων, υπάρχουν μηχανές που δέχονται πολύ μεγάλο ομόρρου, όπως η μηχανή 16 στις 22.5, η 17 στις 202.5, η 9 στις 67.5:



Σχ.3.α.38: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 16 στις 22.5^{o}, 17 στις 202.5^{o} και 9 στις 67.5^{o}

Υπάρχουν και σε άλλες διευθύνσεις μηχανές με τέτοια καμπύλη ισχύος που δεν απεικονίζονται στο παραπάνω διάγραμμα. Άρα, είναι αρκετά δύσκολο να συμπεράνει κανείς σε πια διέυθυνση οι μηχανές δέχονται τις μεγαλύτερες αλληλεπιδράσεις, αφού, πλέον, σε όλα τα ασθενέστερα ζυεγάρια διεθύνσεων, οι μηχανές δέχονται περίπου τις ίδιες έντονες επιδράσεις ομόρρου.

Ακολουθεί το διάγραμμα ενέργειας, συχνότητας – διεύθυνσης:



Σχ.3.α.39: Καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων και παραγωγής ενέργειας σε κάθε διεύθυνση.

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες με τις τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας και τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας:

DIRECTION (º)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)
337.5	32.69	324347469.9
315	21.028	164533683.4
90	6.248	58529773.63

Πίν.3.α.8: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.

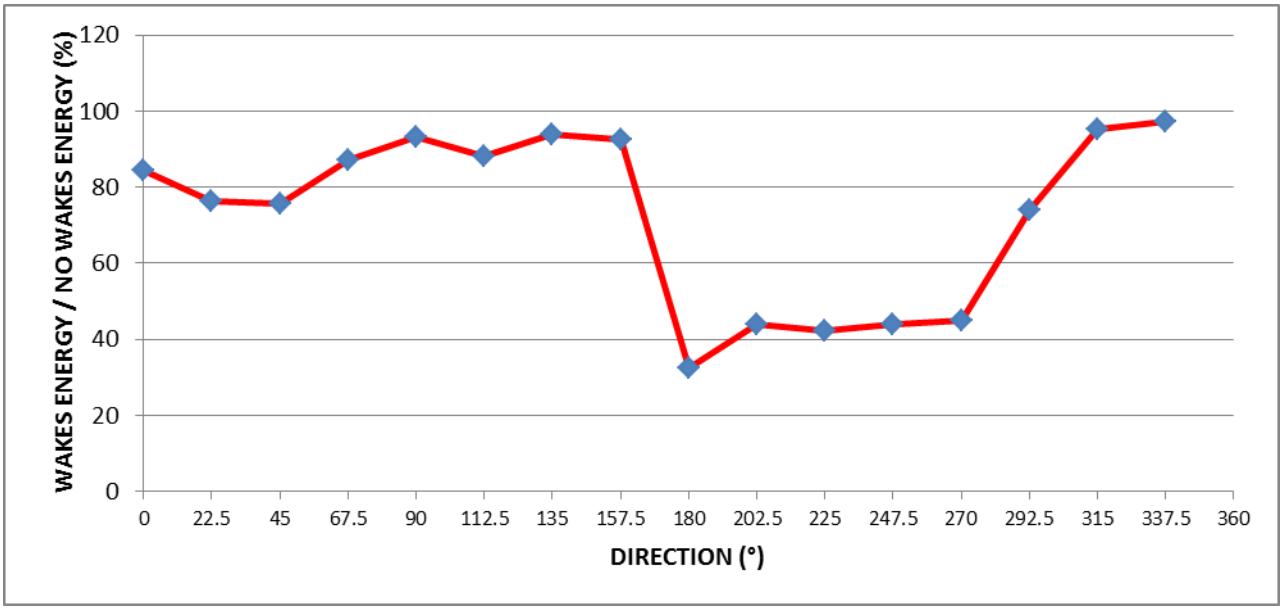
DIRECTION (º)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)/FREQUENCY (%)
337.5	32.69	9921917.097
90	6.248	9367761.465
112.5	2.017	9145174.81

Πίν.3.α.9: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας.

Ο Πίν.3.α.8 παραμένει αμετάβλητος με τους αντίστοιχους πίνακες των δύο μικρότερων πάρκων, όσον αφορά τις 3 διευθύνσεις που αποδίδουν το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας και τη σειρά τους. Ωστόσο, στον Πίν.3.α.9 που δείχνει την παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας, πλέον, και η διέυθυνση των 90 μοιρών, ξεπάρασε αυτή των 112.5, κάτι που δείχνει ότι το ποσοστό αλληλεπίδρασης των μηχανών αυξήθηκε και άλλο στη διεύθυνση αυτή, σε σχέση με τη διεύθυνση των 90 μοιρών, που, άλλωστε, είναι επιθυμητό, αφού οι 90 έχουν υπερτριπλάσια συχνότητα ανέμου.

Και στο πάρκο με τις 40 ανεμογεννήτριες, λοιπόν, η πιο προσοδοφόρα διεύθυνση είναι οι 337.5 μοίρες. Η αναλογία ενέργειας στις 337.5 και 315 μοίρες είναι 324347470/164533683=1.97131>1.94765 που ήταν στις 15 μηχανές. Άρα στις 40 μηχανές, οι μηχανές δέχονται μεγαλύτερο ομόρρου στις 315 από ότι στις 337.5, όπως και στις 15 μηχανές, μόνο που στις 40 η διαφορά αυξήθηκε. Ο EASY, δηλαδή, «προφύλαξε» στη διεύθυνση των 315 τις μηχανές από αλληλεπίδραση ομόρρου, αλλά, ακόμα περισσότερο «προφύλαξε» τις μηχανές από αλληλεπίδραση στη διεύθυνση των 337.5 μοιρών.

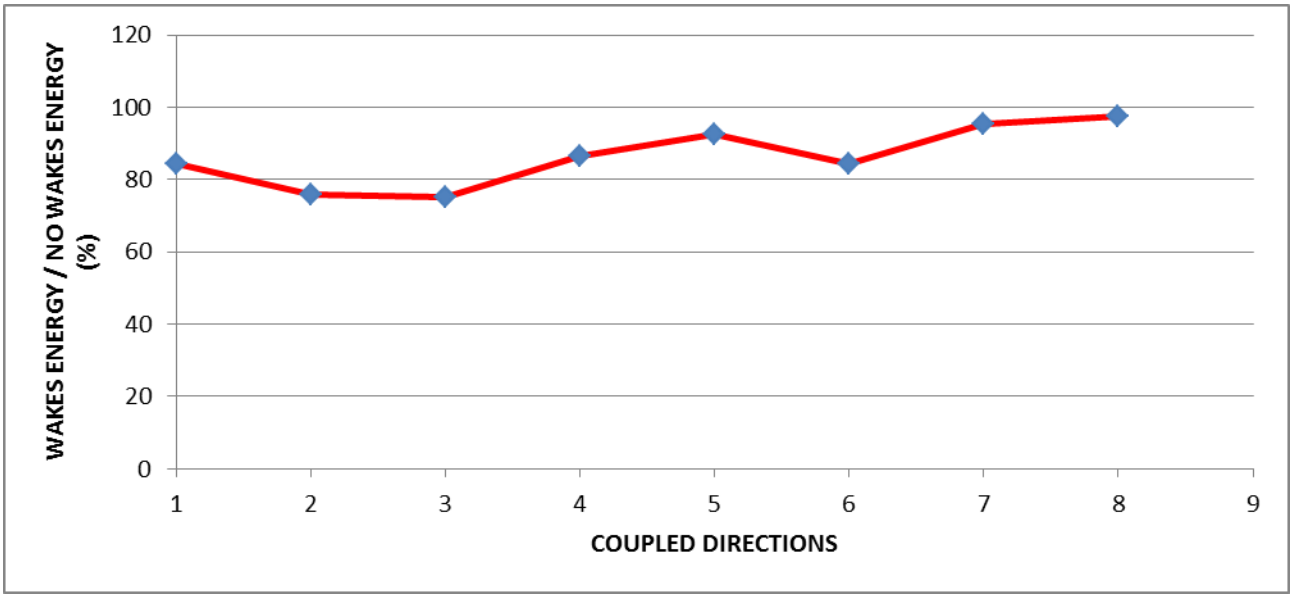
Ακολουθεί διάγραμμα με τα παραγόμενα ποσοστά ενέργειας προς αυτά που θα παράγονταν χωρίς επίδραση, σε κάθε διεύθυνση:



Σχ.3.α.40: Πωσσστό % αποδιδόμενης ενέργειας σε κάθε διεύθυνση προς την ενέργεια που θα αποδιδόταν χωρίς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανών

Μη λαμβάνοντας υπόψην τη διεύθυνση των 180 μοιρών, όπου εξηγήθηκε παραπάνω γιατί έχουν τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας, είναι εμφανές ότι τα πιο φορτισμένα ζευγάρια διευθύνσεων είναι και τα δύο αθροιστικά ασθενέστερα, σύμφωνα με τα ακριβή νούμερα του ρόδου, δηλαδή τα ζευγάρια 22.5-202.5 και 45-225. Βέβαια, και στο ζευγάρι διευθύνσεων 67.5-247.5 οι αλληλεπιδράσεις των μηχανών είναι μεγάλες, αλλά αυτό δεν μπορεί να γίνει εμφανές από το παραπάνω διάγραμμα, λόγω των συχνοτήτων αυτών των διευθύνσεων, που είναι μη μηδενικές για μεγάλες ταχύτητες, με αποτέλεσμα οι μηχανές να παράγουν ενέργεια, ακόμα και αν αυτό ξεκινά να γίνεται στα 9m/s.

Παρατίθεται και το αντίστοιχο διάγραμμα με τα ζευγάρια διευθύνσεων:



Σχ.3.α.40: Πωσσστό % αποδιδόμενης ενέργειας σε κάθε ζευγάρι διευθύνσεων προς την ενέργεια που θα αποδιδόταν χωρίς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανών

Θα είχε ενδιαφέρον σε αυτό το σημείο η άθροιση της ισχύος όλων των μηχανών σε όλες τις ταχύτητες ανέμου, όπου το ρόδο ανέμου δεν παίζει κανάνα ρόλο:

DIRECTION(°)	22.5	202.5	45	225	67.5	247.5
TOTAL POWER (kW)	3284980	3286307	3261164	3260697	3288116	3287313

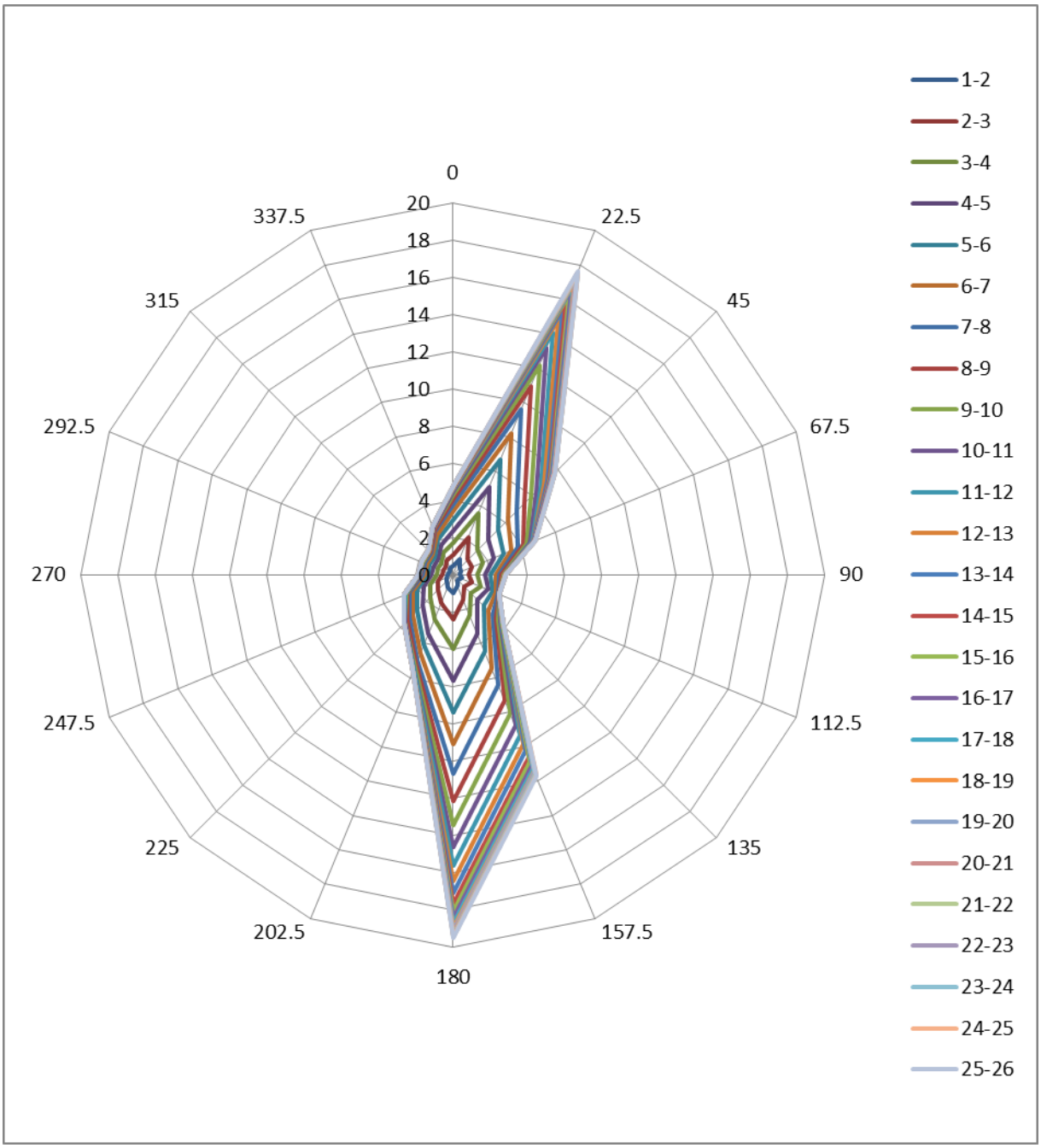
Πίν.3.α.10: Συνολική ισχύς όλων των μηχανών στις διευθύνσεις 22.5 ^{o}, 202.5 ^{o}, 45 ^{o}, 225 ^{o}, 67.5 ^{o}, 247.5 ^{o}.

Η μικρότερη αθροιστική ισχύς είναι στη διεύθυνση 225 μοιρών και συνολικά στο ζευγάρι 45-225 μοιρών, άρα και η μεγαλύτερη επίδραση ομόρρου στις μηχανές. Δεύτερο είναι το ζευγάρι 22.5-202.5, και τρίτο με ελάχιστη διαφορά το 67.5-247.5. Αυτή η επιλογή από τον EASY, έγινε, κατά πάσα πιθανότητα για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες σε ισχυρότερες διευθύνσεις, καθότι, σίγουρα με αυτόν τον τρόπο, ελαχιστοποιείται και η συνολική απώλεια.

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας ΑΕΠ στο πάρκο με τις 40 ανεμογεννήτριες και το πρώτο ρόδο ανέμου Α, για όλες τις διευθύνσεις και ταχύτητες ανέμου και για τις 40 μηχανές, με τις συντεταγμένες που επέλεξε ο EASY, ανέρχεται στις 621760155 kWh, με το CF_{3A} να έχει μειωθεί ακόμα περισσότερο και να έχει, πλέον, την τιμή $0.35489 < CF_{3B} < CF_{3A}$, κάτι που είναι απολύτως λογικό, καθότι αυτό το πάρκο των 40 ανεμογεννητριών έχει τις μεγαλύτερες επιδράσεις ομόρρου μεταξύ των μηχανών από τα 3 πάρκα.

3.α.2

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα μελετηθεί η βελτιστοποίηση της τοποθέτησης των μηχανών για μεγιστοποίηση του ΑΕΠ με τη χρήση ενός διαφορετικού, πολύ πιο περίπλοκου ρόδου ανέμου Β, το οποίο θα δυσκολέψει αρκετά τον EASY στην εύρεση ιδανικών συντεταγμένων. Παρακάτω παρουσιάζεται η απεικόνηση του ρόδου:



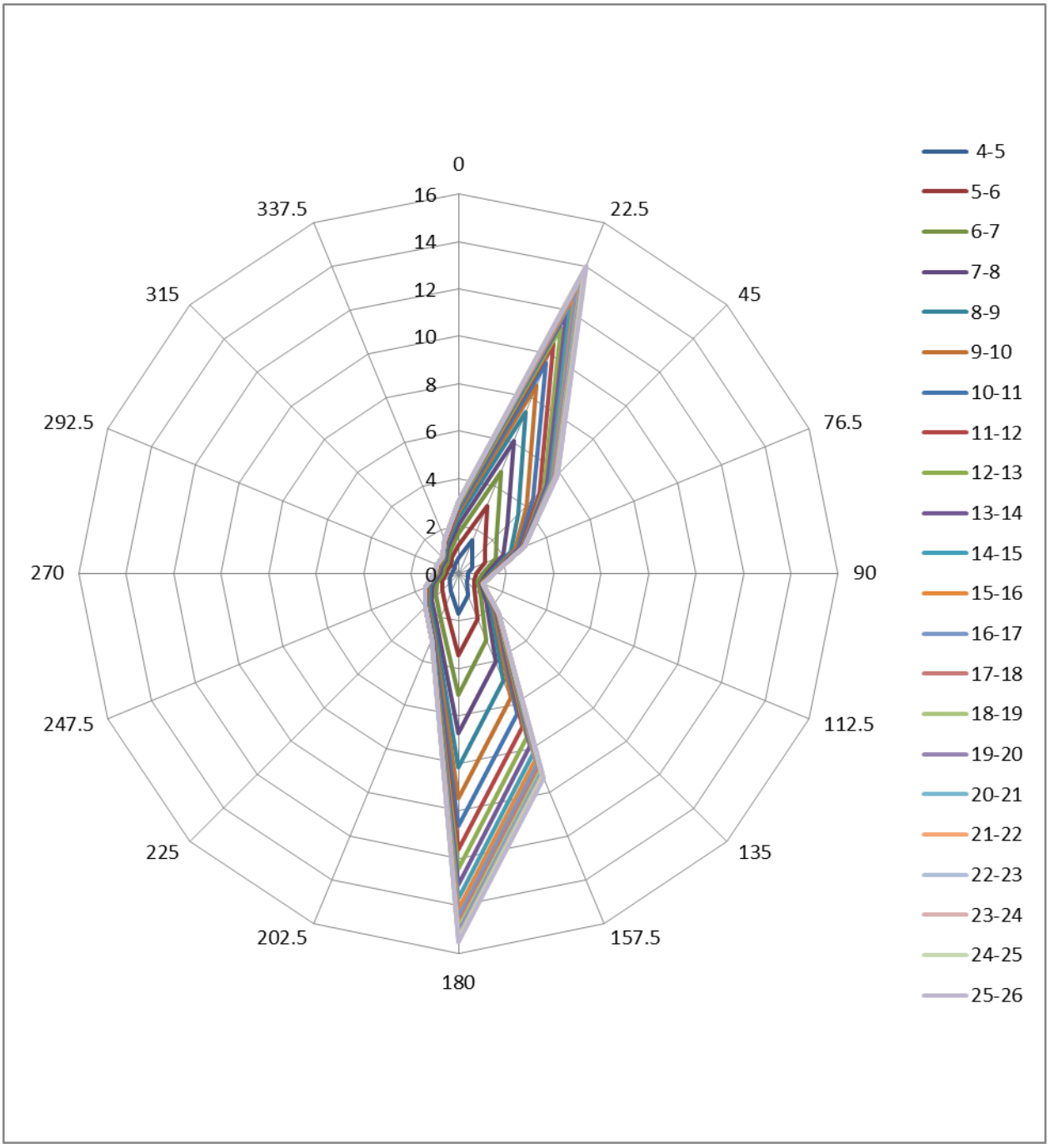
Σχ.3.α.41: Απεικόνιση ρόδου ανέμου Β

Επειδή όμως και εδώ οι μηχανές είναι ακριβώς του ιδίου τύπου, αρχίζουν να παράγουν ισχύ στην ταχύτητα ανέμου των 5m/s. Δίνονται αναλυτικά, εκτός της σχηματικής απεικόνησης απεικόνησης και τα νούμερα του ρόδου, στον ακόλουθο πίνακα, για αυτές τις ταχύτητες, σε όλες τις διεθύνσεις:

	0	**22.5**	**45.0**	**67.5**	**90.0**	**112.5**	**135.0**	**157.5**	**180.0**	**202.5**	**225.0**	**247.5**	**270.0**	**292.5**	**315.0**	**337.5**
4-5	0.63	1.54	0.78	0.63	0.41	0.41	0.5	1.02	1.71	0.82	0.55	0.41	0.27	0.27	0.27	0.41
5-6	0.56	1.56	0.77	0.56	0.34	0.29	0.45	1.04	1.73	0.67	0.45	0.34	0.22	0.22	0.22	0.34
6-7	0.48	1.52	0.73	0.48	0.26	0.18	0.38	1.01	1.69	0.51	0.34	0.26	0.17	0.17	0.17	0.26
7-8	0.38	1.44	0.66	0.38	0.19	0.11	0.31	0.96	1.6	0.37	0.25	0.19	0.12	0.12	0.12	0.19
8-9	0.3	1.32	0.59	0.3	0.13	0.06	0.24	0.88	1.46	0.25	0.17	0.13	0.08	0.08	0.08	0.13
9-10	0.22	1.18	0.5	0.22	0.08	0.03	0.18	0.79	1.31	0.16	0.11	0.08	0.05	0.05	0.05	0.08
10-11	0.16	1.03	0.42	0.16	0.05	0.01	0.13	0.69	1.15	0.1	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.05
11-12	0.11	0.89	0.34	0.11	0.03	0.01	0.09	0.59	0.98	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
12-13	0.07	0.75	0.27	0.07	0.02	0	0.06	0.5	0.83	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
13-14	0.05	0.62	0.22	0.05	0.01	0	0.04	0.41	0.68	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
14-15	0.03	0.5	0.17	0.03	0	0	0.02	0.33	0.56	0.01	0.01	0	0	0	0	0
15-16	0.02	0.4	0.12	0.02	0	0	0.01	0.27	0.45	0	0	0	0	0	0	0
16-17	0.01	0.32	0.09	0.01	0	0	0.01	0.21	0.35	0	0	0	0	0	0	0
17-18	0.01	0.25	0.07	0.01	0	0	0.01	0.16	0.27	0	0	0	0	0	0	0
18-19	0	0.19	0.05	0	0	0	0	0.13	0.21	0	0	0	0	0	0	0
19-20	0	0.14	0.03	0	0	0	0	0.09	0.16	0	0	0	0	0	0	0
20-21	0	0.11	0.02	0	0	0	0	0.07	0.12	0	0	0	0	0	0	0
21-22	0	0.08	0.02	0	0	0	0	0.05	0.09	0	0	0	0	0	0	0
22-23	0	0.06	0.01	0	0	0	0	0.04	0.06	0	0	0	0	0	0	0
23-24	0	0.04	0.01	0	0	0	0	0.03	0.04	0	0	0	0	0	0	0
24-25	0	0.03	0	0	0	0	0	0.02	0.03	0	0	0	0	0	0	0
25-26	0	0.06	0.01	0	0	0	0	0.04	0.07	0	0	0	0	0	0	0

Πιν.3.α.11: Ακριβή νούμερα του ρόδου Β

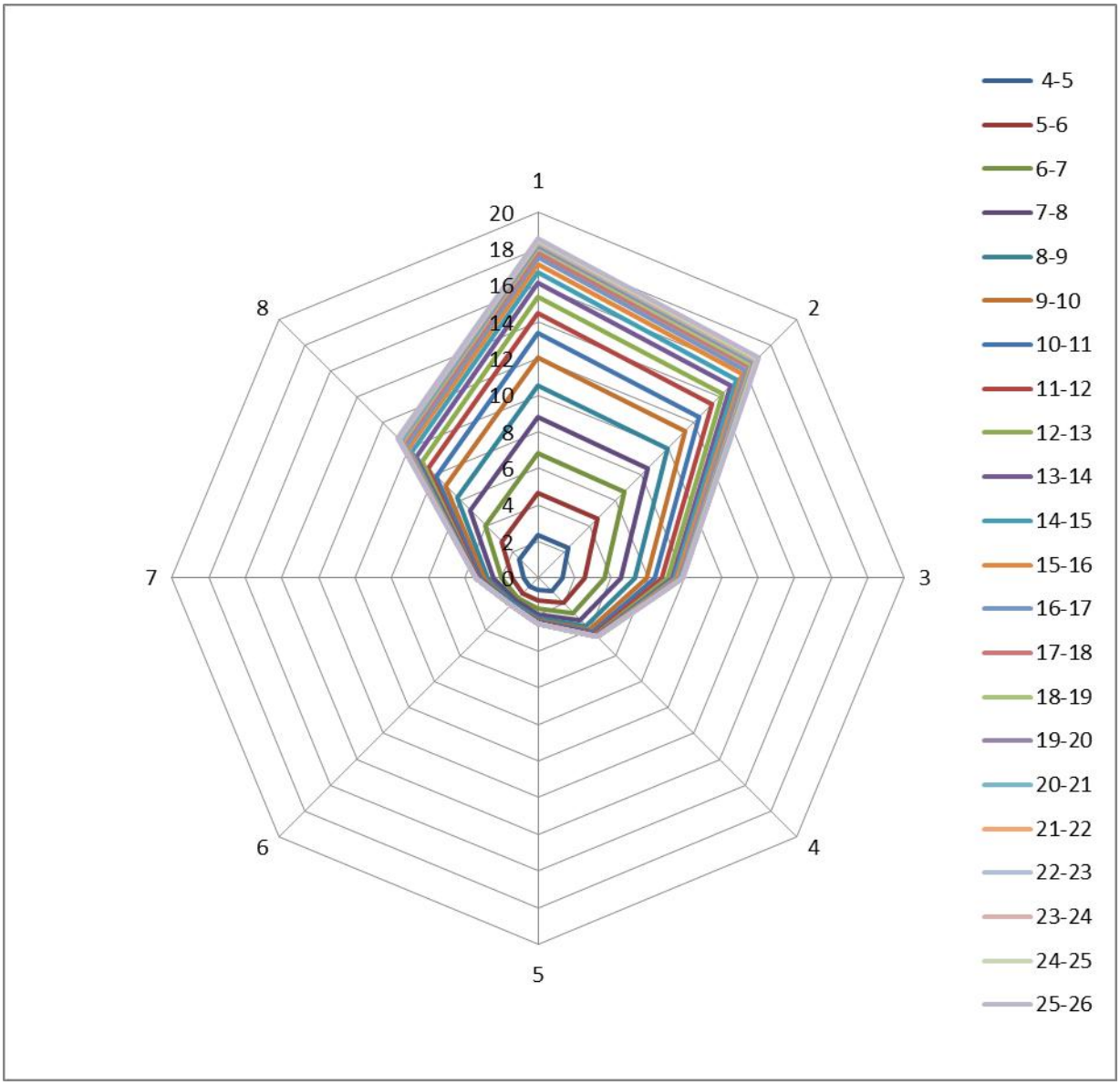
Άρα, με βάση το παρακάτω ρόδο θα γίνει η βελτιστοποίηση:



Σχ.3.α.42: Απεικόνιση του ρόδου Β στο εύρος ταχυτήτων λειτουργίας των μηχανών

Όπως φαίνεται, υπάρχουν δύο κύριες διευθύνσεις των 180 και των 22.5 μοιρών, με πρώτη αυτή των 180 μοιρών μία λίγο ασθενέστερη των 157.5, αρκετές μέσες αλλά και πολλές χαμηλές όπως αυτές των 90, 112.5, 225, 247.5, 270, 292.5, 315 και 337.5 μοιρών, με ασθενέστερες αυτές των 270, 292.5 και 315 μοιρών, που έχουν όμοια ελάχιστη πιθανότητα..

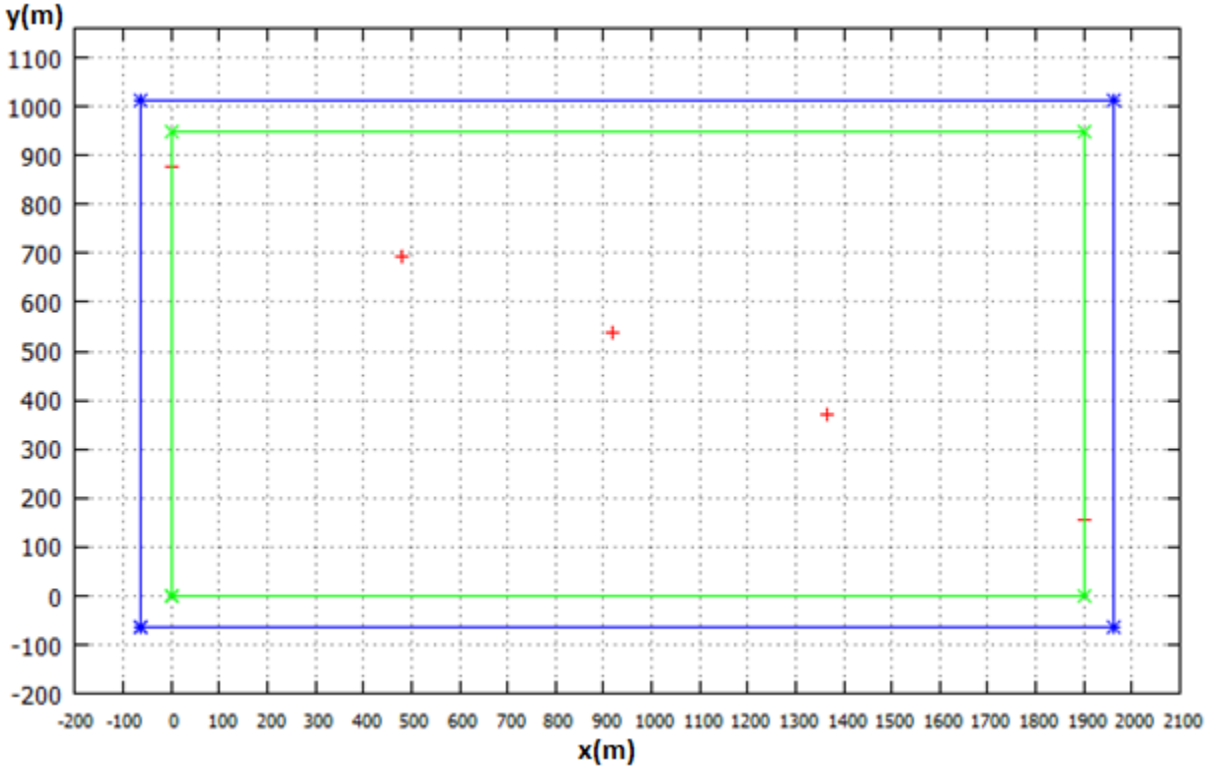
Είναι, θετικό το γεγονός ότι οι κύριες διευθύνσεις είναι σχεδόν απέναντι, διότι αν ήταν κάθετες, η βελτιστοποίηση της μίας θα κατέστρεφε την άλλη. Βέβαια, οι επόμενες 4 κυριότερες διευθύνσεις είναι σε αρκετά ασύμφορες για βελτιστοποίηση γωνίες μεταξύ τους. Επίσης, θετικό κρίνεται το ότι απέναντι από τις βορειοδυτικές διευθύνσεις χαμηλών συχνοτήτων υπάρχουν οι 90 και 112.5 που είναι διευθύνσεις χαμηλών συχνοτήτων. Ακολουθεί το ρόδο ανέμου με τα ζευγάρια διευθύνσεων, που, όπως έχει αποδειχτεί, είναι το σημαντικότερο για την τοποθέτηση των μηχανών:



Σχ.3.α.43: Απεικόνιση ρόδου Β για ζευγάρια διευθύνσεων

Είναι, λοιπόν, ακόμα πιο εμφανές μετά το τελευταίο σχήμα, ότι έχουμε δύο σχεδόν ισοδύναμα κύρια ζευγάρια διευθύνσεων το 0-180 και το 22.5-202.5, με κυριότερο το 0-180, τα οποία είναι

δίπλα δίπλα, κάτι αρκετά καλό. Επίσης, έχουμε δύο ζευγάρια ασθενών διευθύνσεων, τα 90-270 και 112.5-292.5, με ασθενέστερη την 112.5-292.5 που είναι επίσης δίπλα δίπλα, και μάλιστα, είναι κάθετες ως προς τις κύριες, που συνεπάγεται ότι η καταστροφή των ασθενών θα βολεύει τη βελτιστοποίηση των κυρίων. Ωστόσο, υπάρχουν ένα πολύ αδύνατο σημείο του ρόδου: το γεγονός ότι οι κύριες διευθύνσεις δεν έχουν πολύ μεγάλη συχνότητα ανέμου, ούτε οι ασθενείς πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να έχουν αρκετά μικρή διαφορά μεταξύ τους, σε σχέση με το πρώτο ρόδο, κάτι που θα παίξει δραματικό ρόλο στην παραγωγή ισχύος, καθότι, στις ασθενείς, όπου θα υπάρχει μέγιστη αλληλεπίδραση ομόρρου των μηχανών, θα χάνεται αρκετά μεγάλο ποσό ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζεται το χωράφι ενεργών διαστάσεων 1900m επί 950m, με τις βέλτιστες, κατά τον EASY συντεταγμένες x,y των μηχανών:

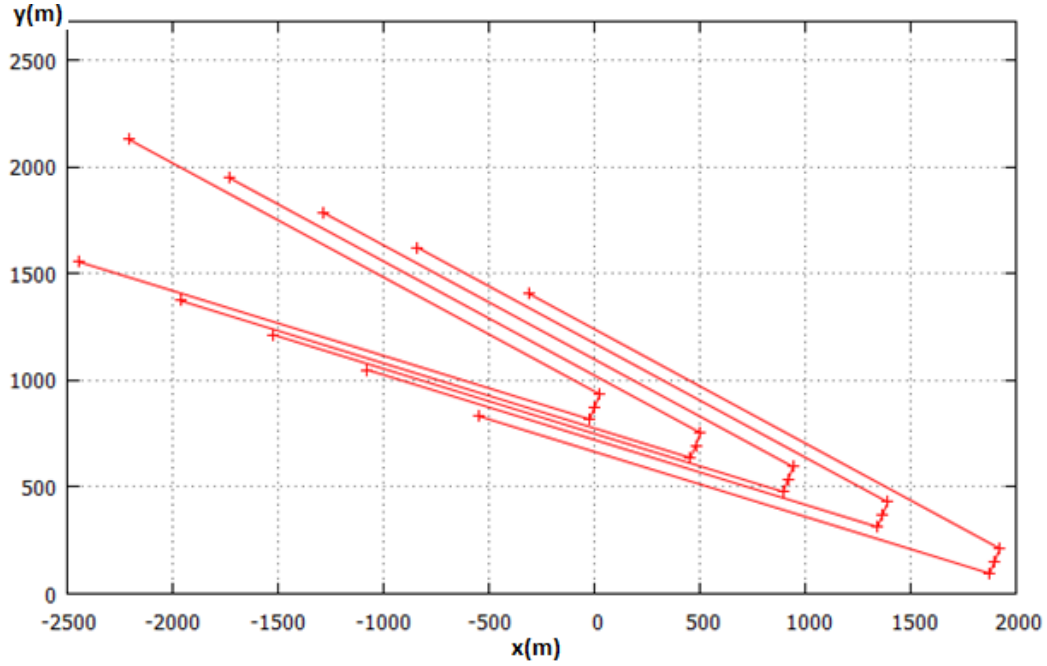


Σχ.3.α.44: Βελτιστοποιημένο πάρκο 5 ανεμογεννητριών με το ρόδο ανέμου B

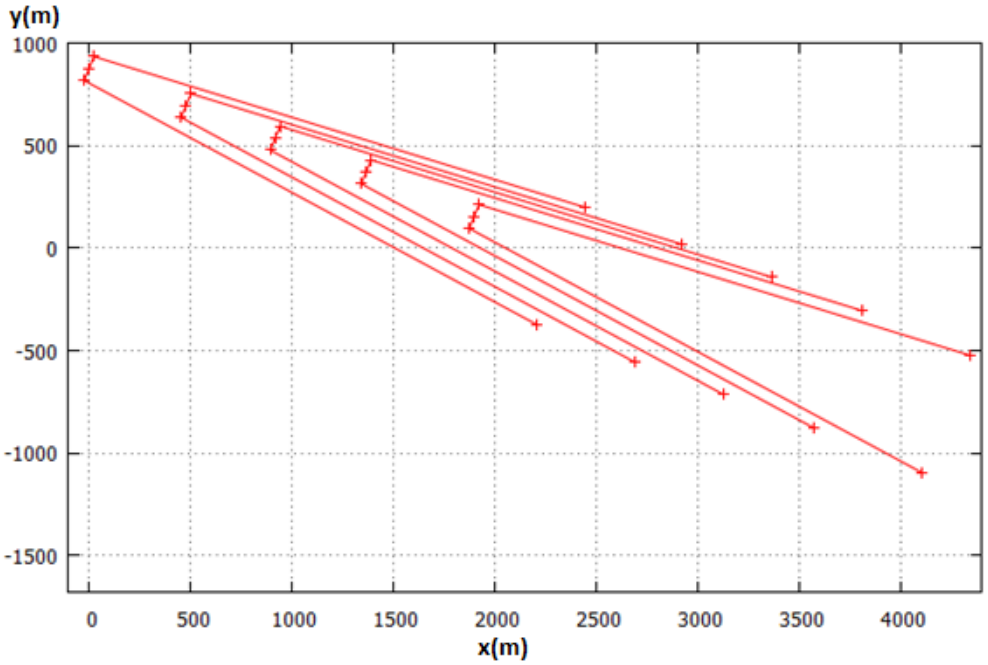
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	x(m)	y(m)
1	0.391	876.027
2	478.963	695.206
3	918.102	536.204
4	1367.319	371.331
5	1899.217	153.620

Πίν.3.α.12: Συντεταγμένες x,y των μηχανών

Πιο εμφανής δε θα μπορούσε να γίνει η τοποθέτηση των μηχανών στο ζευγάρι διευθύνσεων 112.5-292.5, ώστε εκεί να υπάρχει μεγιστοποίηση ομόρρου μεταξύ των μηχανών, καθότι είναι το πιο χαμηλό σε συχνότητα ανέμου. Βέβαια, παρότι έχει μεγάλη συχνότητα για ζευγάρι ελάχιστης συχνότητας, αν συγκριθεί με το ζευγάρι 22.5-202.5 στο προηγούμενο ρόδο, η γωνία του είναι ιδανική για ορθογώνιο πάρκο, όπως θα μπορούσε μόνο η 67.5-247.5 να είναι, διότι η γωνία της δεύτερης διαγωνίου του πάρκου σε σχέση με τον άξονα x είναι πολύ κοντά στις 22.5 μοίρες (περίπου 20), με αποτέλεσμα να μπορούν να τοποθετηθούν οι μηχανές περίπου στη διαγώνιο, άρα να έχουν επαρκή χώρο να είναι σε μία σειρά η μία πίσω από την άλλη, χωρίς να υπάρχει μεγάλη απώλεια ισχύος λόγω μικρών αποστάσεων (οι αποστάσεις είναι περίπου 520m μεταξύ των μηχανών), κάτι που στο προηγούμενο ρόδο ήταν αδύνατο να γίνει διότι οι αποστάσεις θα ήταν πολύ μικρές (θα ήταν περίπου 250m). Έτσι επιτυγχάνεται η μέγιστη αλληλεπίδραση σε αυτές τις γωνίες, χωρίς σπατάλες ισχύος, και μόνο μία ανεμογεννήτρια στις δύο διευθύνσεις του ζευγαριού δέχεται αέρα πάρκου (ενώ στο προηγούμενο είχαμε δύο), κάτι που δεν μπορεί να «βελτιστοποιηθεί» άλλο! Επίσης, με αυτήν τοποθέτηση σε μία σειρά επιτυγχάνεται να μην υπάρχουν επιδράσεις σε άλλα ζευγάρια διευθύνσεων, πλην ίσως των πλαινών 90-270 (που είναι και το δεύτερο ασθενέστερο) και το 135-315, ενώ με τις δύο σειρές μηχανών που είχαμε στο προηγούμενο ρόδο, υπήρχαν ελαφρές αλληλεπιδράσεις και σε διάφορες διευθύνσεις. Τώρα θα παρουσιαστούν οι απεικονήσεις ομόρρου των διευθύνσεων 112.5 και 292.5 για του λόγου το αληθές:

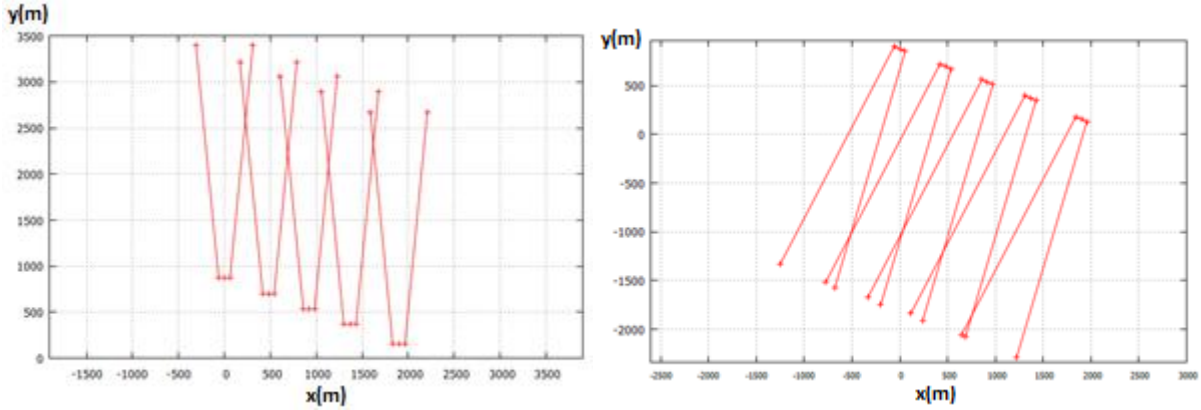


Σχ.3.α.45: Απεικόνιση ομόρρου στις 112.5^{o}



Σχ.3.α.46: Απεικόνιση ομόρρου στις 292.5°

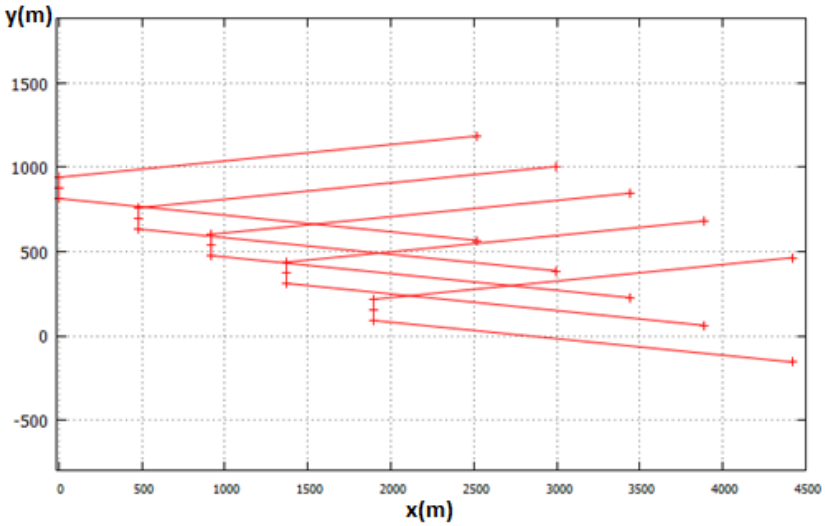
Είναι εμφανέστατη η επιλογή του EASY να επιβαρύνει όσο το δυνατόν περισσότερο τις μηχανές σε αυτό το ζευγάρι. Παρ' όλα αυτά, άξια προσοχής είναι και η επιλογή του να απομακρύνει σε κάθε περίπτωση την κάθε μηχανή από την κεντρική γραμμή του ομόρρου της προηγούμενης, ιδίως στις 112.5 μοίρες που έχουν και μεγαλύτερη πιθανότητα από τις 292.5 σύμφωνα με το ρόδο, αλλά και το γεγονός ότι στις 112.5 μοίρες η πρώτη με τη δεύτερη μηχανή έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη απόσταση, κάτι που περιορίζει ως ένα βαθμό την επίδραση στις μηχανές που δέχονται ομόρρου στις 112.5, για τον ίδιο λόγο. Ακολουθούν οι απεικονήσεις ομόρρου της κύριας διευθυνσης των 180 μοιρών και της δεύτερης 22.5 μοιρών:



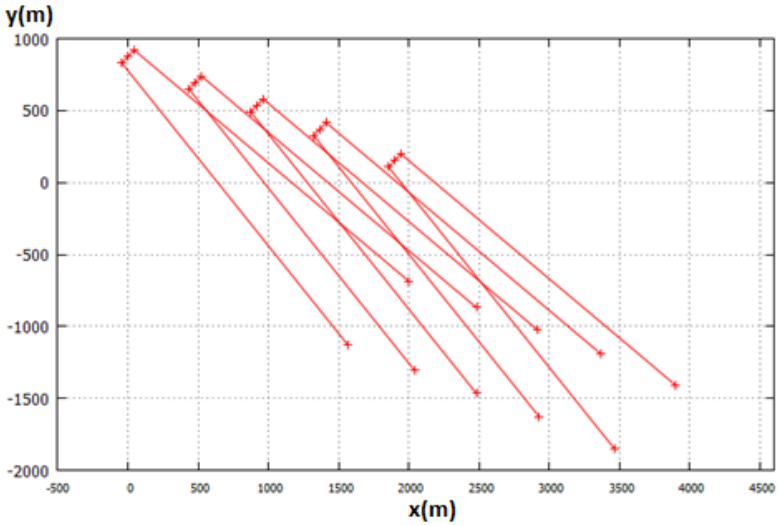
180° 22.5°

Σχ.3.α.47: Απεικόνιση ομόρρου στις 180° και 22.5°

Φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις δεν υπάρχει αλληλεπίδραση, ωστόσο, στη διεύθυνση των 22.5 ο ομόρρους της κάθε μηχανής είναι ακόμα πιο απομακρυσμένος από τον ομόρρου της διπλανής, διότι η διεύθυνση 22.5 είναι κάθετη στο ζευγάρι 112.5-292.5. Παρακάτω θα φανεί αν υπάρχει επίδραση ομόρρου στα δίπλα ζευγάρια διευθύνσεων 90-270 και 135-315, και πιο συγκεκριμένα τις διευθύνσεις 270 και 315 μοιρών, που έχουν και τη χαμηλότερη συχνότητα:



270°

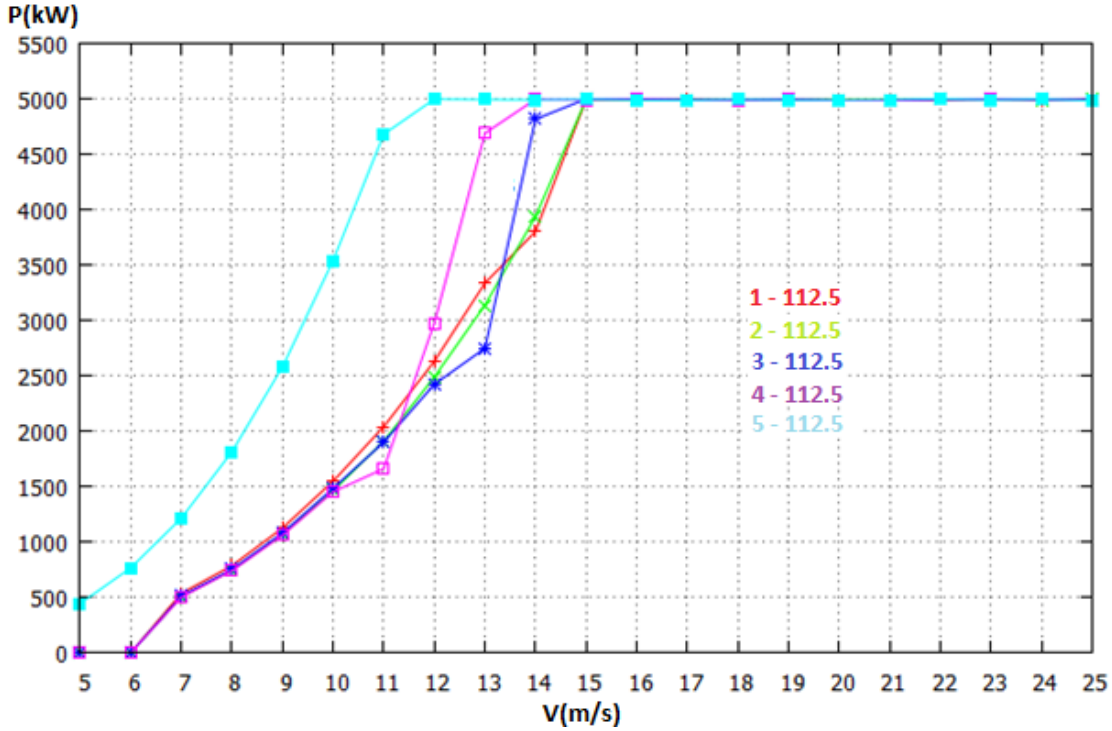


315°

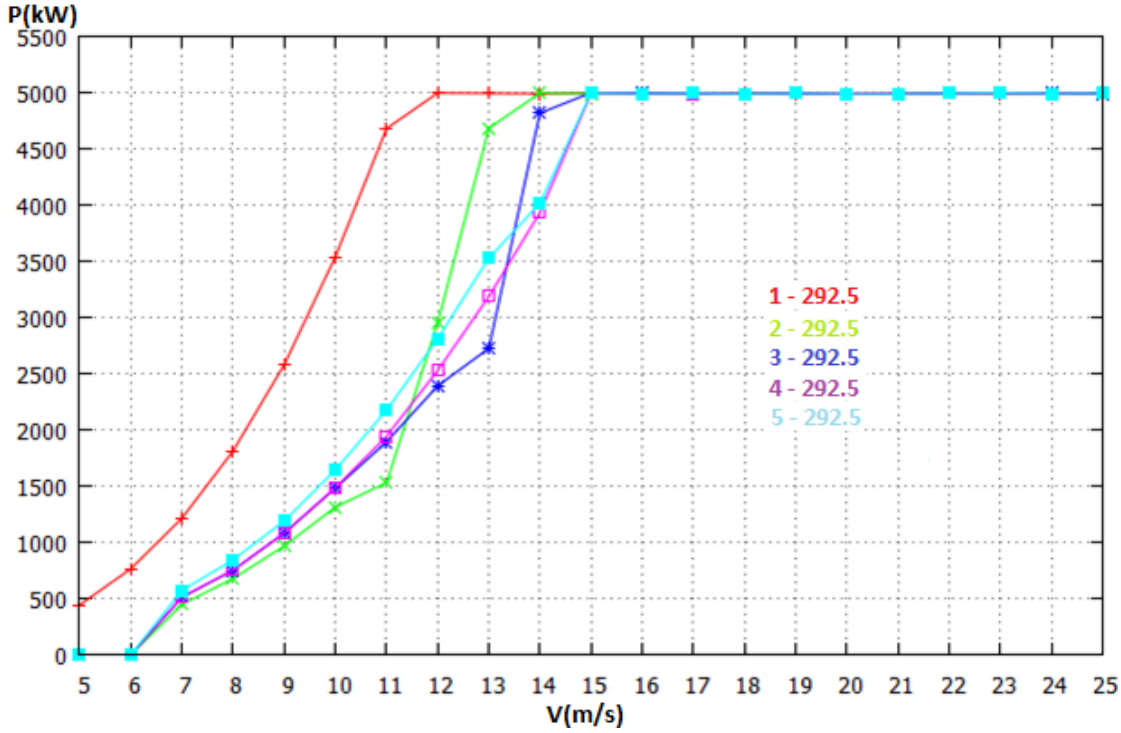
Σχ.3.α.48: Απεικόνιση ομόρρου στις 270° και 315°

Στη διεύθυνση των 270 μοιρών, παρατηρείται μία πολύ μικρή αλληλεπίδραση, στις 3 μεσαίες μηχανές, οι οποίες βλέπουν ταχύτητα ελαφρώς μικρότερη από την ταχύτητα πάρκου, αλλά στις 315 δεν υπάρχει ομόρρους, ακόμα κι αν η διεύθυνση αυτή έχει ελάχιστη συχνότητα. Αυτό, συμβαίνει επειδή οι 315 ανήκουν στο ίδιο ζευγάρι με τις 135, που έχουν μία μέση συχνότητα ανέμου. Αυτό ο EASY το πέτυχε τοποθετώντας τις μηχανές, όχι ακριβώς με γωνία 112.5 μοιρών ως προς τη βόρεια διεύθυνση, αλλά με ελαφρώς μικρότερη, ώστε αν σε ένα από τα δίπλα ζευγάρια διευθύνσεων 90-270 και 135-315 οι μηχανές δέχονται ομόρρου (διότι υποχρεωτικά σε κάποιο θα δέχονται, αφού για να αποφευχθεί αυτό θα έπρεπε να τοποθετηθούν με μικρότερες αποστάσεις μεταξύ τους στη διεύθυνση 112.5 και θα χανόταν πολύ μεγαλύτερο ποσό ενέργειας), αυτό να είναι το μικρότερης συχνότητας 90-270. Τελικά, στις 112.5-292.5, το ότι οι μηχανές βρίσκονταν μακριά από την κεντρική γραμμή, οφείλεται στο γεγονός ότι η τοποθέτηση των μηχανών είναι σε γωνία ελαφρώς μικρότερη των 112.5, το οποίο όμως εξυπηρετεί τον παραπάνω σκοπό.

Αξίζει, τώρα, να απεικονιστεί η καμπύλη ισχύος όλων των μηχανών στις 112.5 και 292.5 μοίρες:



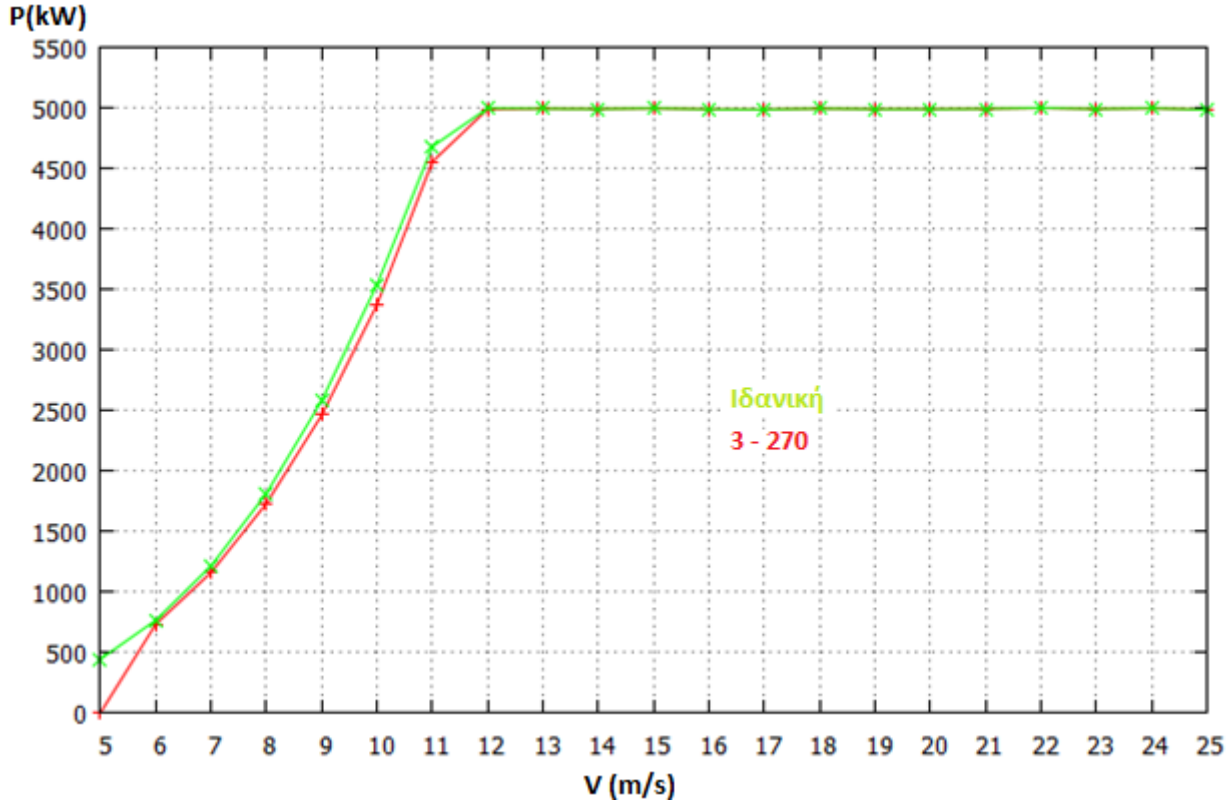
Σχ.3.α.49: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 1,2,3,4 και 5 στις 112.5°



Σχ.3.α.50: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 1,2,3,4 και 5 στις 292.5°

Αρχικά, στη διεύθυνση 112.5 υπάρχει μία σειρά αλληλεπίδρασης, όπου έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο το γεγονός ότι η πρώτη μηχανή που δέχεται ομόρρου, εδώ η 2, δέχεται το μεγαλύτερο ομόρρου, και, ως εκ τούτου τη μικρότερη ταχύτητα ανέμου, με αποτέλεσμα να παράγει και τη μικρότερη ισχύ, για ταχύτητες πάρκου μέχρι και 11m/s. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, θα ήταν λογικό οι μηχανές 1,2 και 3 να δέχονται μικρότερη ταχύτητα ανέμου από τη 4, σε όλο το φάσμα λειτουργίας τους, αφού έχουν και περίπου ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, σύμφωνα με το μοντέλο ομόρρου Abramovich, αφού, έτσι, κάθε φορά, η ταχύτητα θα μειωνόταν. Ωστόσο, σύμφωνα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, ο τύπος του οποίου αναγράφεται στο κεφάλαιο 2, στο οποίο γίνεται η περιγραφή του κώδικα, σε μία μηχανή που δέχεται περισσότερους του ενός ομόρρους, η ταχύτητα ανέμου που δέχεται εξαρτάται, όχι μόνο στον άνεμο που δέχεται από την τελευταία μηχανή, αλλά και από όλες τις προηγούμενες ξεχωριστά. Για το λόγο αυτό, για μικρές ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα έχει τη μεγαλύτερη πτώση της στην πρώτη μηχανή που δέχεται ομόρρου, ενώ μετά να αυξάνεται ελαφρώς. Έτσι οι μηχανές 1,2 και 3 δέχονται μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου από τη 4. Όσον αφορά τις μεγάλες ταχύτητες ανέμου, το μοντέλο αλληλεπίδρασης έχει μία όμοια μορφή με τις μικρές, καθώς η ταχύτητα ανέμου έχει μεγάλη πτώση στη μηχανή 4, ωστόσο μετά συνεχίζει η πτώση με πολύ αργό ρυθμό, έως ότου σταθεροποιηθεί. Για αυτό το λόγο, ξαφνικά, η μηχανή 4, ενώ στα 11m/s παράγει τη μικρότερη ισχύ, στα 12m/s έχει ήδη ξεπεράσει και τις 3 άλλες μηχανές 1,2 και 3 που δέχονται ομόρρου. Για τους ίδιους ακριβώς λόγους παρατηρείται ότι, η 1, που ήταν πρώτη εκ των τεσσάρων φορτισμένων μηχανών, καταλήγει τελευταία. Ακριβώς τα

ίδια συμβαίνουν και στην περίπτωση των 292.5 μοιρών, με ανάποδη, προφανώς τη σειρά των μηχανών, μόνο που εκεί, η 2 είναι ακόμα πιο χαμηλά σε ισχύ στις ταχύτητες μέχρι και 11m/s, από όσο ήταν στις 112.5 η 4, διότι η απόσταση 1-2 εδώ είναι μικρότερη της απόστασης 4-5 στις 112.5. Ακριβώς για τον ίδιο λόγο, η μηχανή 5 δεν καταλήγει τελευταία σε ισχύ, όπως η 1 προηγουμένως. Ακολουθεί και η καμπύλη ισχύος της πιο φορτισμένης μηχανής στις 270 μοίρες, σε σχέση με την καμπύλη ισχύος αναφοράς, που είναι η επόμενη πιο φορτισμένη διεύθυνση από τις 112.5 και 292.5:

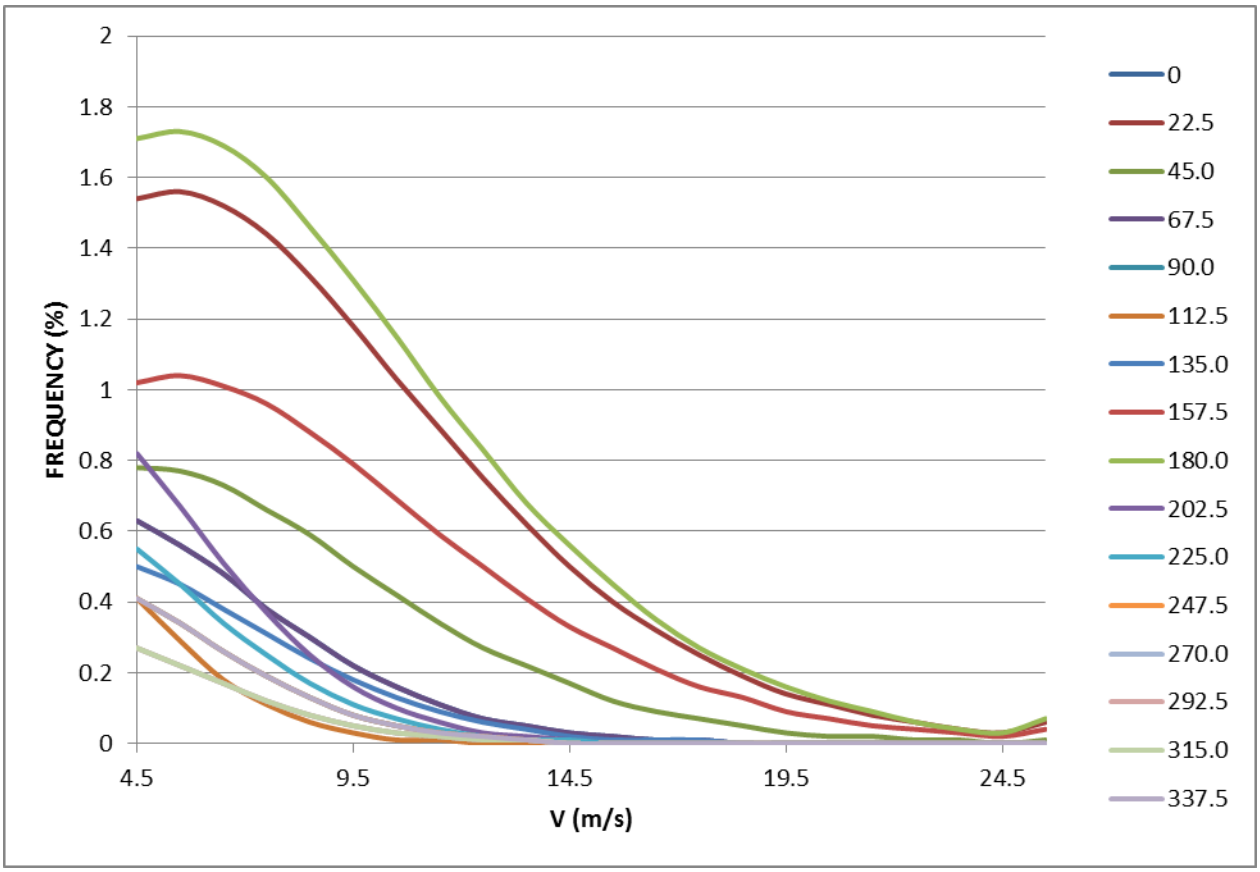


Σχ.3.α.51: Καμπύλη ισχύος της μηχανής 3 στις 270°

Από το διάγραμμα αυτό μπορεί κανείς να κατανοήσει ότι, ακόμα και η πιο φορτισμένη μηχανή σε όλες τις διευθύνσεις πλην των 112.5 και 292.5, δηλαδή η 3 στις 270 μοίρες, είναι πολύ πιο αφόρτιστη από όλες τις μηχανές που δέχονται ομόρρου στις 112.5 και 292.5 μοίρες, πράγμα που δείχνει για ακόμα μια φορά την επιλογή του EASY.

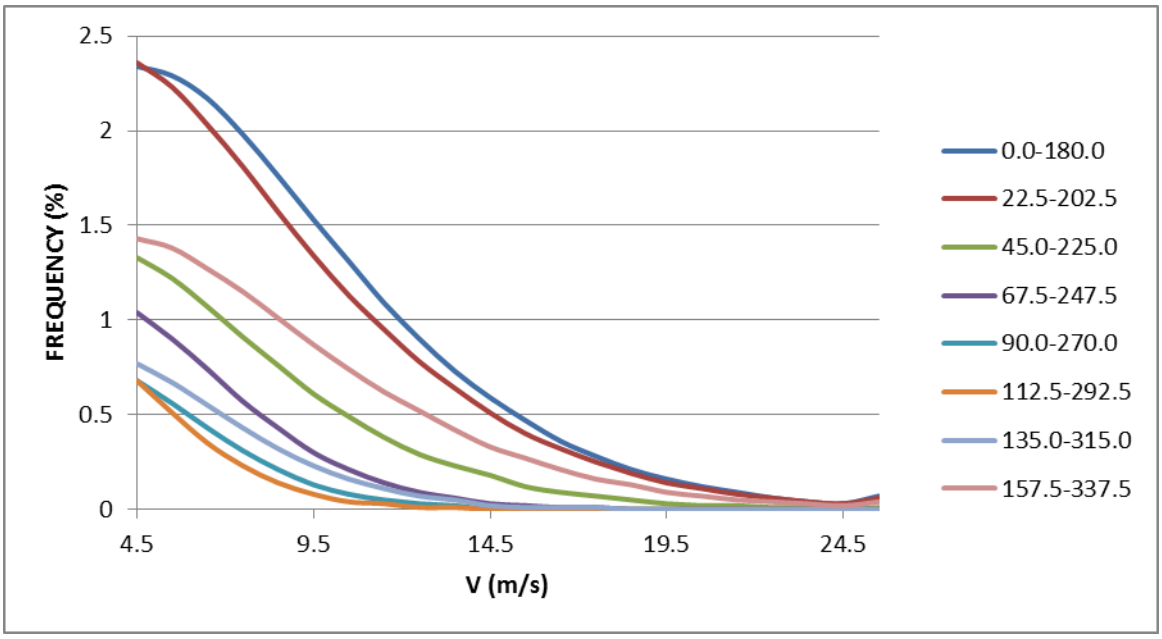
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο με το πρώτο ρόδο ανέμου, και εδώ, δεν έχει σημασία μόνο η αθροιστική συχνότητα για όλες τις ταχύτητες των 2 κύριων διευθύνσεων, αλλά και σε ποιες ταχύτητες η μία υπερισχύει της άλλης σε συχνότητα. Από το Σχ.3.α.42 , αλλά εμφανέστερα από ακριβή νούμερα συχνοτήτων του ρόδου στον Πιν.3.α.11, οι διευθύνσεις 22.5, 45, 157.5 και 180 μοιρών (και τα αντίστοιχα ζευγάρια τους), έχουν μη μηδενικές συχνότητες σε όλες τις ταχύτητες ανέμου, μέχρι και στα 25.5m/s, αλλά σε όλο το

φάσμα είναι σταθερά μπροστά η διεύθυνση των 180 μοιρών, με δεύτερη τις 22.5. Αυτά φαίνονται πολύ καθαρά με το παρακάτω διάγραμμα:



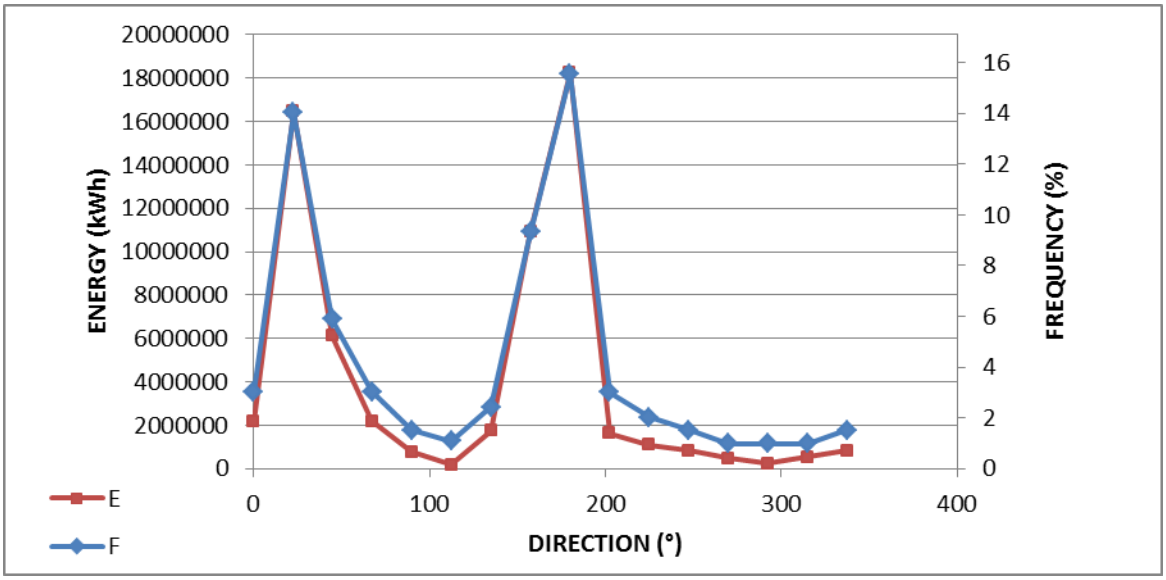
Σχ.3.α.52: Καμπύλη συχνοτήτων ρόδου Α για όλες τις διευθύνσεις

Επειδή, βέβαια, ακόμα μεγαλύτερης σημασίας είναι το αντίστοιχο διάγραμμα ζευγαριών, παρατίθεται και αυτό:



Σχ.3.α.53: Καμπύλη συχνοτήτων ρόδου Α για όλες τα ζευγάρια διευθύνσεων

Έτσι λοιπόν, στη διεύθυνση 180 μοιρών, αφού υπάρχει και μηδενικός ομόρρους στις μηχανές, θα έχουμε σίγουρα τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας, αλλά όχι με σιγουριά και τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας καθώς, υπάρχουν και άλλες διευθύνσεις με μηδενικό ομόρρου και ρυθμό μείωσης συχνότητας παραπλήσιο με αυτόν των 180 μοιρών. Το παρακάτω διάγραμμα συνοδευόμενο από τους Πίν.3.α.13 και Πίν.3.α.14, θα απαντήσει σε όλα τα ερωτήματα:



Σχ.3.α.54: Καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων και παραγωγής ενέργειας για την κάθε διεύθυνση

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες με τις τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας και τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας:

DIRECTION(°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)
180	15.55	18220763.97
22.5	14.03	16465601.97
157.5	9.33	10941949.04

Πίν.3.α.13: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας

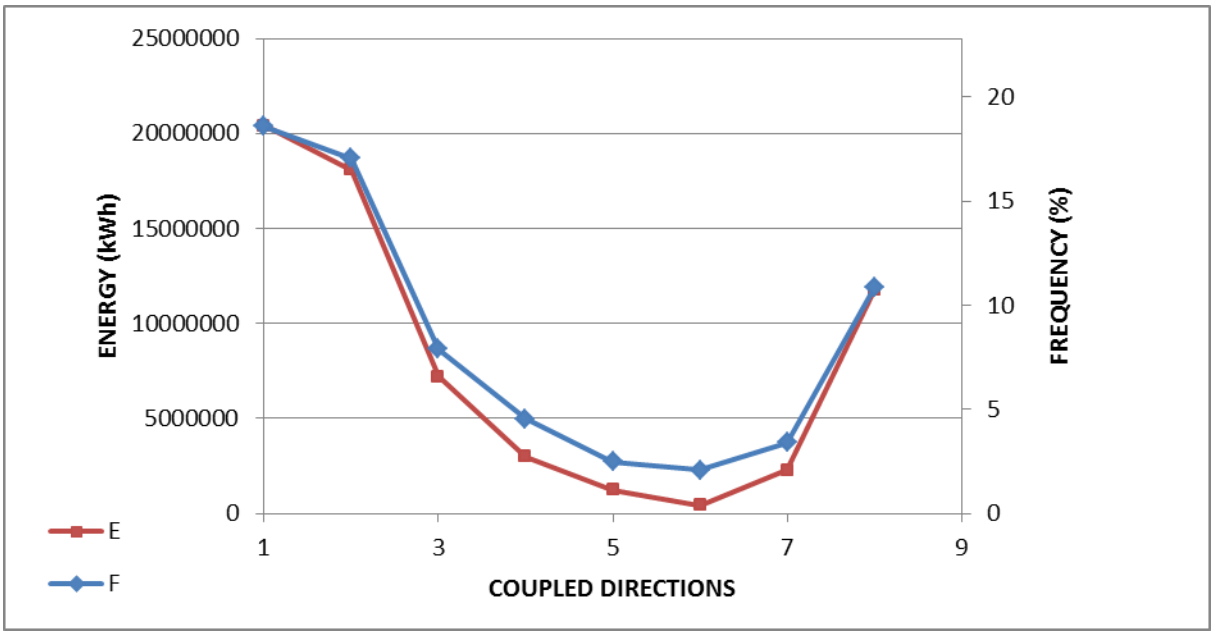
DIRECTION(°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)/FREQUENCY(%)
22.5	14.03	1173599.57
157.5	9.33	1172770.53
180	15.55	1171753.31

Πίν.3.α.14: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας

Όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, οι 3 πρώτες διευθύνσεις με τις υψηλότερες συχνότητες ανέμου, είναι οι 3 πρώτες, με την ίδια σειρά, και σε παραγωγή ενέργειας, όπως φαίνεται στον Πίν.3.α.13.

Ωστόσο, όσον αφορά την ενέργεια ανά μονάδα συχνότητας, οι 3 πρώτες διευθύνσεις είναι και εδώ οι ίδιες, με διαφορετική, όμως, σειρά, αν και οι διαφορές είναι ελάχιστες. Αυτή η εικόνα, οφείλεται και στην κατανομή των συχνοτήτων στις διάφορες ταχύτητες ανέμου, αλλά και στις αναλογίες που έχουν οι συχνότητες για την κάθε διέυθυνση στις διάφορες ταχύτητες, δηλαδή στο πόσο αναλογικά μικρότερες είναι οι συχνότητες ανέμου στις μεγάλες ταχύτητες από ότι στις μεγάλες, στην εκάστοτε διεύθυνση. Εδώ, μπορεί κανείς να πει ότι, επειδή τα νούμερα είναι υπερβολικά κοντά, η αναλογίες είναι σχεδόν ολόιδιες στις 3 αυτές διευθύνσεις, με ελάχιστες διαφορές, που απεικονίζονται με αυτές τις αναιπέσθητες διαφορές στην ενέργεια ανά μονάδα συχνότητας.

Είναι σχεδόν βέβαιο ότι στα χωράφια των 15 και 40 μηχανών, επειδή ο EASY θα επιδιώξει να προφυλάξει τις μηχανές στις διευθύνσεις 180 και 22.5 μοιρών, η διεύθυνση των 157.5 μοιρών θα μείνει πίσω σε σχέση με τις άλλες δύο, όσον αφορά την ενέργεια ανά συχνότητα, και ειδικά στο πάρκο με τις 40 μηχανές, κατά πάσα πιθανότητα, πρώτη θα είναι η κυριότερη διεύθυνση των 180 μοιρών. Σε αυτή την περίπτωση ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει να παρεμβάλουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα με τα ζευγάρια διευθύνσεων:



Σχ.3.α.55: Καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων και παραγωγής ενέργειας για το κάθε ζευγάρι διευθύνσεων

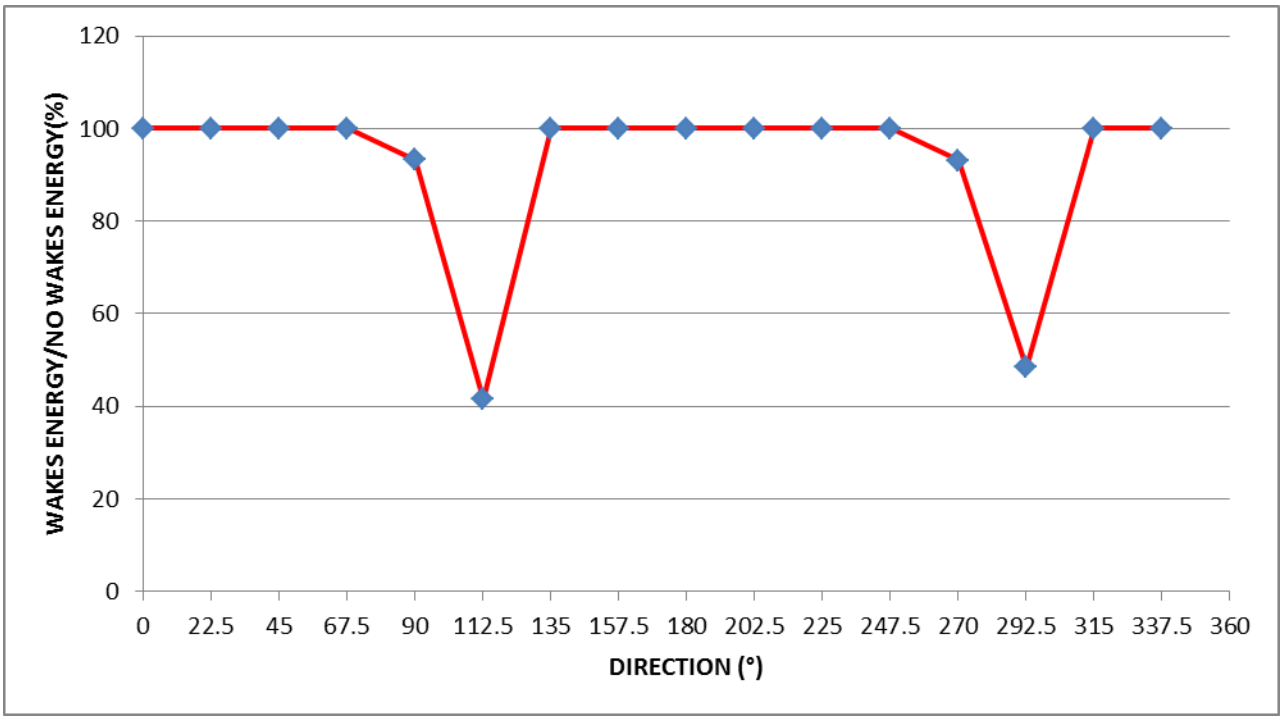
Εδώ φαίνεται ότι το ζευγάρι 0-180 είναι πρώτο και σε παραγωγή ενέργειας αλλά και σε παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας. Παρακάτω αποδεικνύεται με νούμερα:

COUPLED DIRECTIONS (°)	ENERGY (kWh)/FREQUENCY (%)
0-180	1098504.74
22.5-202.5	1084037.195
157.5-337.5	1061777.8

Πίν.3.α.15: Τα 3 ζευγάρια διευθύνσεων με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας

Επόμένως, αφού μεμονομένα η διεύθυνση 180 είναι τρίτη, ενώ αθροιστικά με τη διεύθυνση 0, που είναι η «απέναντί» της, συντελούν ένα ζευγάρι που είναι πρώτο, σημαίνει ότι η 0 είναι πολύ καλύτερες αναλογίες συχνοτήτων από τις «απέναντι» των διευθύνσεων 22.5 και 157.5, δηλαδή τις 202.5 και 337.5, κάτι που, πράγματι, ισχύει, σύμφωνα με τα αναλυτικά νούμερα του ρόδου, ιδίως στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Επίσης, είναι άξιο παρατήρησης του πόσο μειώθηκε η ενέργεια ανά συχνότητα στα ζευγάρια από ότι μεμονομένα στις τρεις διευθύνσεις. Αυτό είναι απόδειξη του πόσο χειρότερο ποσό ενέργειας ανά συχνότητα έχουν οι «απέναντι» διευθύνσεις τους.

Ακολουθεί διάγραμμα ποσοστών ενέργειας προς το ποσοστό που θα παραγόταν αν δεν υπήρχε επίδραση ομόρρου:



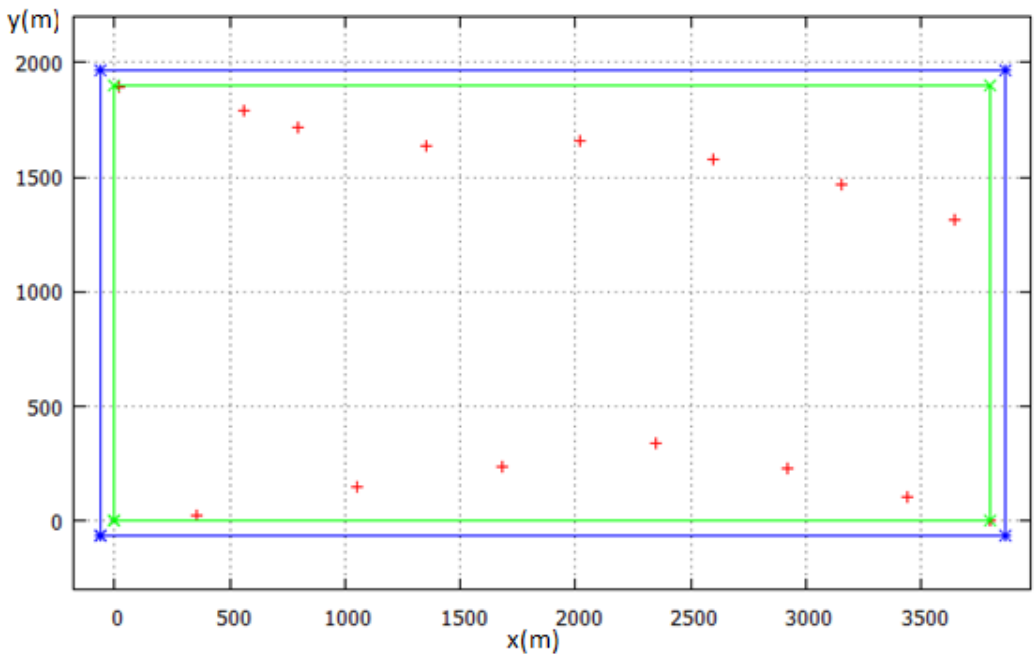
Σχ.3.α.56: Ποσσστό % αποδιδόμενης ενέργειας σε κάθε διεύθυνση προς την ενέργεια που θα αποδοδίταν χωρίς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανών

Ενώ στο πάρκο των 5 μηχανών με το πρώτο ρόδο, οι απώλειες δεν ήταν μόνο στο ασθενέστερο ζευγάρι, με αυτό το ρόδο ο EASY κατάφερε να το πετύχει. Αυτό συμβαίνει, διότι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το ζευγάρι 112.5-292.5 δίνει τη δυνατότητα διάταξης των 5 μηχανών σε μία σειρά, και όχι σε δύο, όπως με το πρώτο ρόδο, με αποτέλεσμα να έχουν απώλειες μόνο σχεδόν οι διευθύνσεις του ασθενέστερου ζευγαριού, και ελάχιστα οι 90-270 που είναι το δεύτερο ασθενέστερο ζευγάρι.

Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας ΑΕΠ στο πάρκο των 5 ανεμογεννητριών με το δεύτερο ρόδο ανέμου Β, για όλες τις διευθύνσεις και ταχύτητες ανέμου και όλες τις μηχανές, με τις βέλτιστες συντεταγμένες που επιλέχθηκαν από τον EASY, ανέρχεται στις 64431292 kWh, και το CF_{1B}=0.29421. Το ΑΕΠ του πάρκου είναι περίπου κατά 20% μικρότερο του ΑΕΠ που είχε το πάρκο με τις 5 μηχανές και το πρώτο ρόδο ανέμου, όπως και το CF, αποτέλεσμα που οφείλεται, αποκλειστικά και μόνο στο ρόδο ανέμου Β, όπου οι ασθενέστερες διευθύνσεις στις οποίες οι μηχανές έχουν αλληλεπίδραση ομόρρου, έχουν αρκετά μεγάλες συχνότητες σε

σχέση με τις αντίστοιχες του ρόδου Α, και οι κύριες, αισθητά μικρότερες, με αποτέλεσμα στις ασθενείς να χάνεται σημαντικό ποσοστό ισχύος στις μηχανές και, κατ' επέκταση, σημαντικό ποσό ενέργειας. Ο κύριος λόγος, όμως, που το ΑΕΠ είναι τόσο μικρότερο, είναι το γεγονός ότι το ρόδο Β έχει μικρότερο άθροισμα συχνοτήτων σε ταχύτητας ανέμου άνω των 5m/s, καθώς οι συχνότητες για μικρότερες ταχύτητες δεν εμπλέκονται στη βελτιστοποίηση. Δεν οφείλεται, λοιπόν, σε λανθασμένη τοποθέτηση των μηχανών από τον EASY,και αυτό αποδεικνύεται από το ότι το CF ενός πάρκου με μία μόνο μηχανή, οπότε δεν υπάρχει αλληλεπίδραση με άλλη σε καμία διεύθυνση, και με το συγκεκριμένο ρόδο ανέμου, υπολογίστηκε από τον κώδικα ίσο με 0.29695, ελάχιστα μεγαλύτερο από αυτό του πάρκου. Άρα, ο EASY έκανε σωστή επιλογή, καθώς το CF του πάρκου προσεγγίζει το αξεπέραστο 0.29695 από κάθε πάρκο με αυτό το ρόδο ανέμου. Βέβαια, το ποσοστό του CF ως προς το απόλυτο είναι 0.29421/0.29695 = 0.99077, άρα 0.923% απώλεια, ενώ για το πρώτο ρόδο ήταν 0.37226/0.37441 = 0.99426, άρα 0.574% απώλεια. Αυτό το αποτέλεσμα που οφείλεται στις σχετικά μικρές διαφορές συχνοτήτων μεταξύ ισχυρών και ασθενών διευθύνσεων ανέμου του ρόδου Β. Με βάση και το παραπάνω διάγραμμα, όπου οι απώλειες ενέργειας είναι σχεδόν μόνο στο ζευγάρι 112.5-292.5, μπορεί κανείς να πει ότι η τοποθέτηση των μηχανών από τον EASY είναι τέλεια, καλύτερη από ότι με το πρώτο ρόδο. Μπορεί να προστεθεί ότι μία τέτοια τοποθέτηση με το πρώτο ρόδο θα μπορούσε να γίνει μόνο αν η μικρή πλευρά του χωραφιού ήταν στον άξονα x και η μεγάλη στον y, ώστε ο EASY να καταφέρει να τοποθετήσει και τις 5 μηχανές στη σειρά στο ζευγάρι διευθύνσεων 22.5 – 202.5.

Παρακάτω θα επικεντρωθούμε στο χωράφι των 15 ανεμογεννητριών ενεργών διαστάσεων 3800m επί 1900m, με το δεύτερο ρόδο ανέμου. Εδώ φαίνονται οι συντεταγμένες των ανεμογεννητριών, έτσι όπως τις «επέλεξε» ο EASY, για βέλτιστη παραγωγή ισχύος:

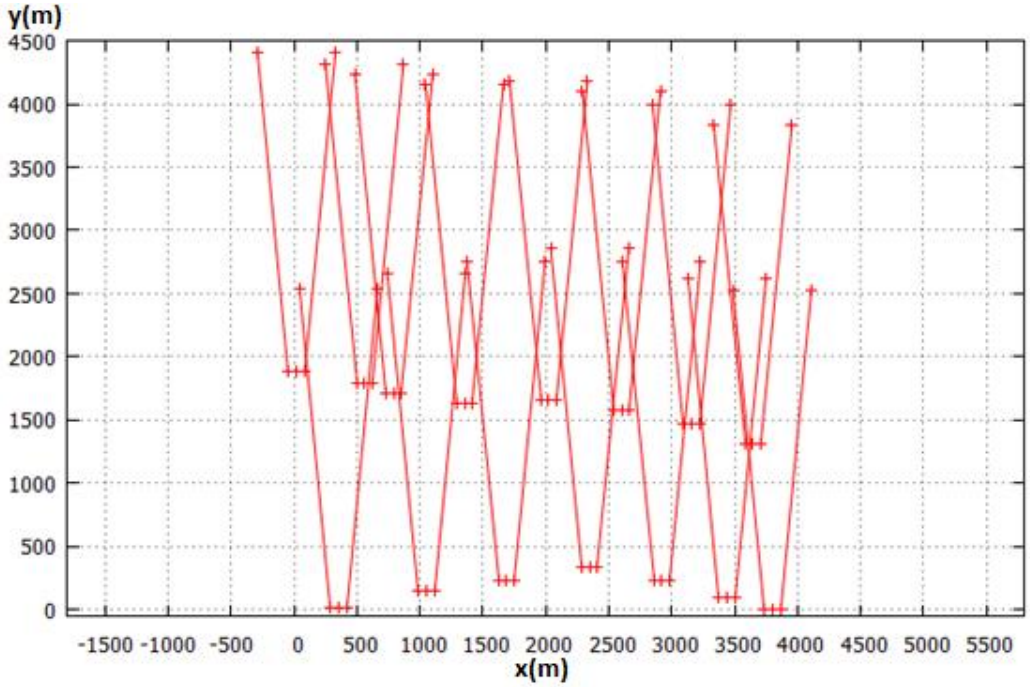


Σχ.3.α.57: Βελτιστοποιημένο πάρκο 15 ανεμογεννητριών με το ρόδο ανέμου Β.

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	x(m)	y(m)
1	3440.020	102.740
2	3644.912	1311.448
3	19.178	1888.650
4	558.806	1792.368
5	1684.540	235.812
6	1050.881	144.814
7	2021.233	1659.589
8	2601.174	1580.235
9	2919.178	227.984
10	3158.219	1469.667
11	2349.706	335.421
12	792.661	1717.515
13	353.523	20.352
14	3799.609	2.740
15	1353.620	1635.910

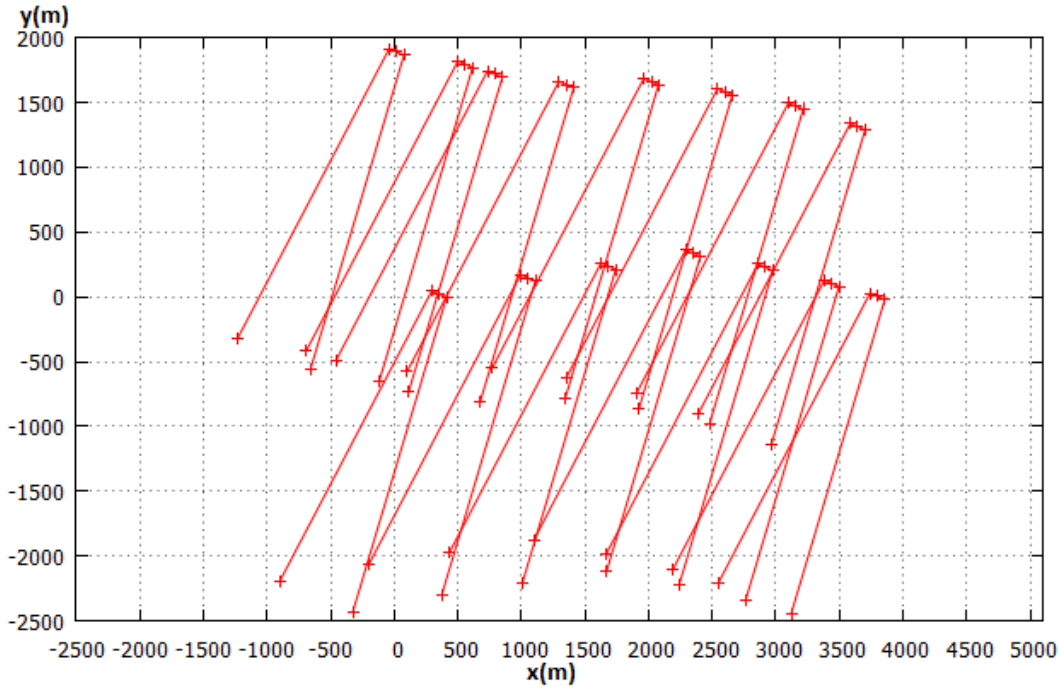
Πίν.3.α.16: Συντεταγμένες x,y των μηχανών

Βλέποντας το Σχ.3.α.57 , θα μπορούσε κανείς να καταλήξει ότι ο EASY προσπάθησε να τοποθετήσει τις μηχανές στο ζευγάρι διευθύνσεων χαμηλότερης συχνότητας 112.5-292.5, καθώς και στο δεύτερο πιο ασθενές ζευγάρι που είναι το 90-270. Ωστόσο, οι μηχανές έχουν τοποθετηθεί σε διάταξη δύο σειρών, περίπου παράλληλων στον άξονα x, κάτι που θα μπορούσε να θεωρηθεί αποτυχία, διότι φαίνεται στα δύο πιο ισχυρά ζευγάρια διευθύνσεων να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανών. Πριν όμως καταλήξουμε σε λάθος συμπεράσματα, παρατίθεται παρακάτω η απεικόνηση ομόρρου στις δύο κυριότερες διευθύνσεις των 180 και 22.5 μοιρών:



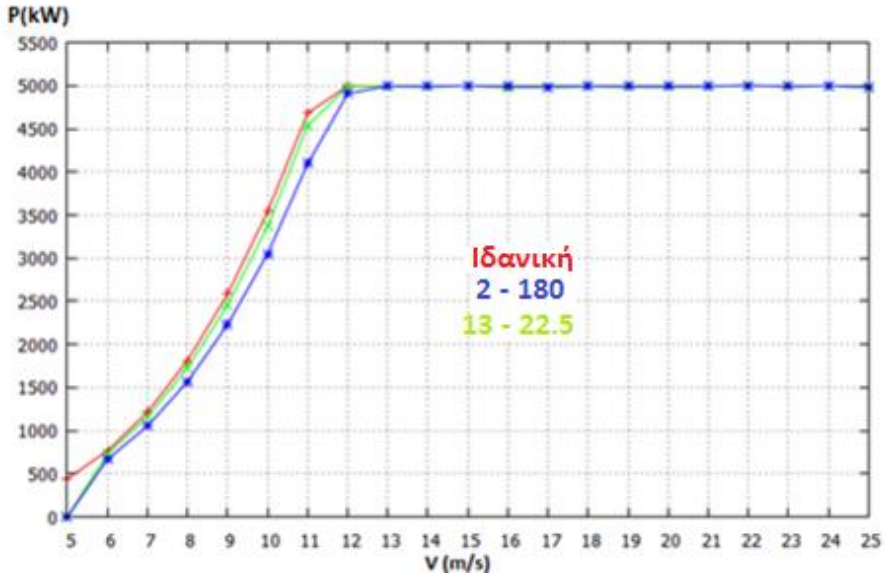
Σχ.3.α.58: Απεικόνιση ομόρρου στις 180°

Πράγματι υπάρχει επίδραση ομόρρου σε κάποιες μηχανές, είναι όμως ελάχιστη, καθότι βρίσκονται πολύ μακριά από την κεντρική γραμμή του ομόρρου των μηχανών που επάγουν, αλλά και σε πολύ μεγάλη απόσταση από αυτές (περίπου 1500m, δηλαδή 12,5 διάμετροι). Η απεικόνηση του ομόρρου στις 22.5 μοίρες φαίνεται παρακάτω:



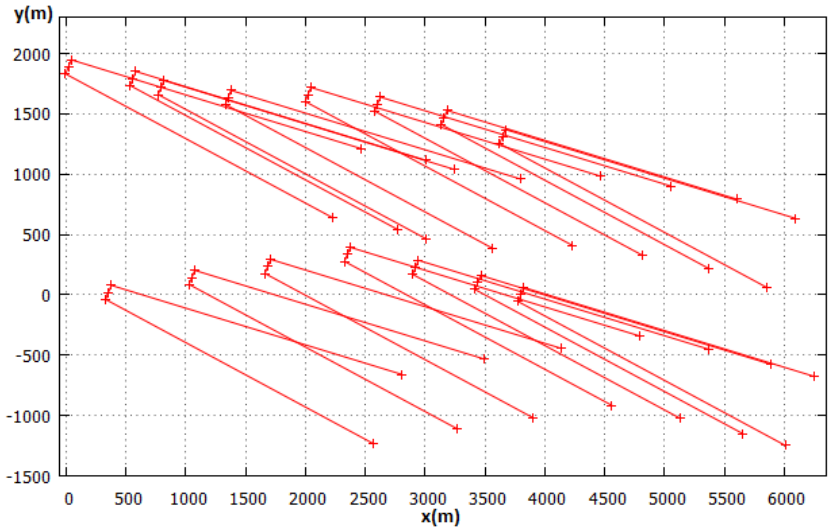
Σχ.3.α.59: Απεικόνιση ομόρρου στις 22.5^{o}

Πολύ καλή φαίνεται η τοποθέτηση και για τη διεύθυνση των 22.5 μοιρών, καθώς και εδώ, οι μηχανές είναι μακριά από την κεντρική γραμμή ομόρρου των μηχανών που επάγουν και σε μεγάλη απόσταση (περίπου 1500m και εδώ). Για να δοθεί μία καλύτερη εικόνα της ορθότητας της τοποθέτησης των μηχανών στις 180 και 22.5 μοίρες, παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος των πιο φορτισμένων μηχανών των δύο αυτών διευθύνσεων, της μηχανής 2 στις 180 μοίρες και της μηχανής 13 στις 22.5 μοίρες, σε σχέση με την ιδανική:

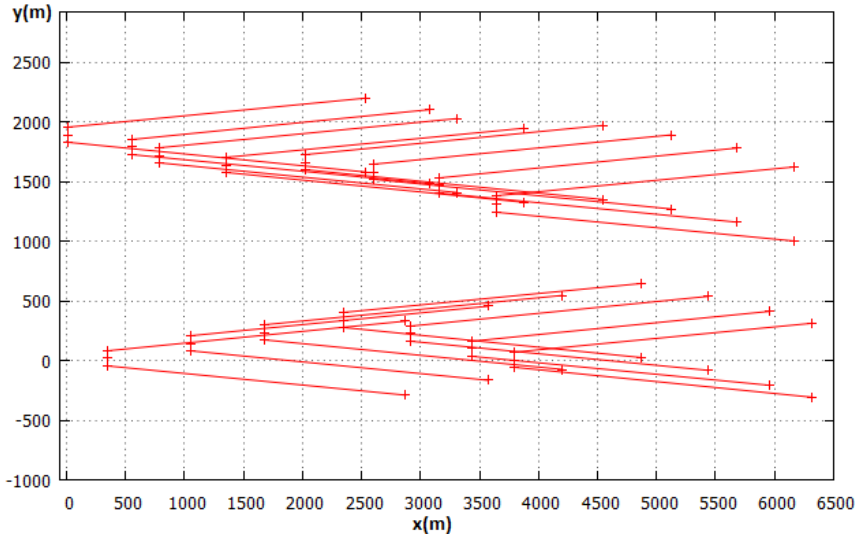


Σχ.3.α.60: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 2 στις 180° και 13 στις 22.5^{o}

Εδώ φαίνεται ότι και στις δύο διευθύνσεις, οι μηχανές αυτές, παρότι δέχονται το μεγαλύτερο ομόρρου, προσεγγίζουν αρκετά την ιδανική καμπύλη, και ιδιαίτερα η μηχανή στις 22.5 μοίρες, παρόλο που η κυριότερη διεύθυνση είναι οι 180 μοίρες. Ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι στις 22.5 μοίρες υπάρχει και συνολικά μικρότερη αλληλεπίδραση από ότι στις 180. Άλλωστε, αυτό θα φανεί από το διάγραμμα ενέργειας, συχνότητας ανά κατεύθυνση και πιο συγκεκριμένα από τις νέες αναλογίες παραγωγής ενέργειας ανά συχνότητα που θα υπολογιστούν αργότερα. Από το Σχ.3.α.61 του χωραφιού είναι σίγουρα εμφανής η έντονη αλληλεπίδραση στις διευθύνσεις 292.5 και 270 μοίρες, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στα ακόλουθα σχήματα:



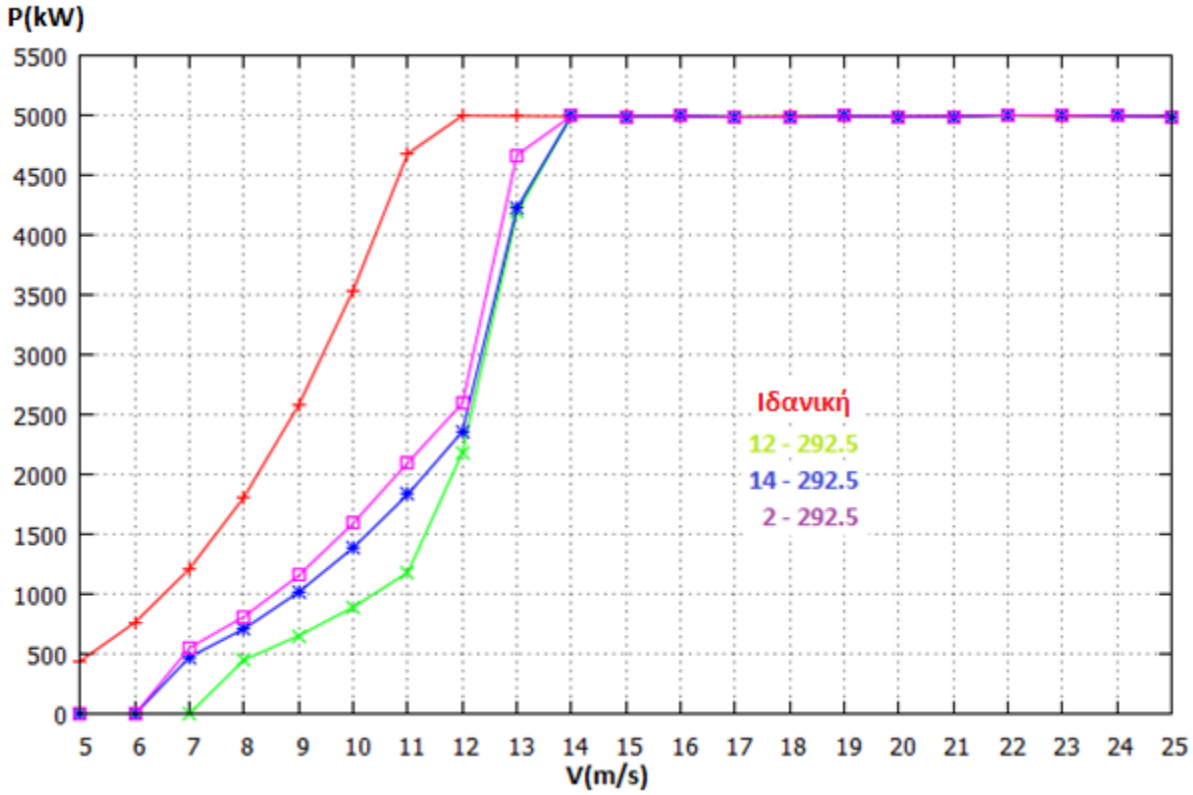
292.5^{o}



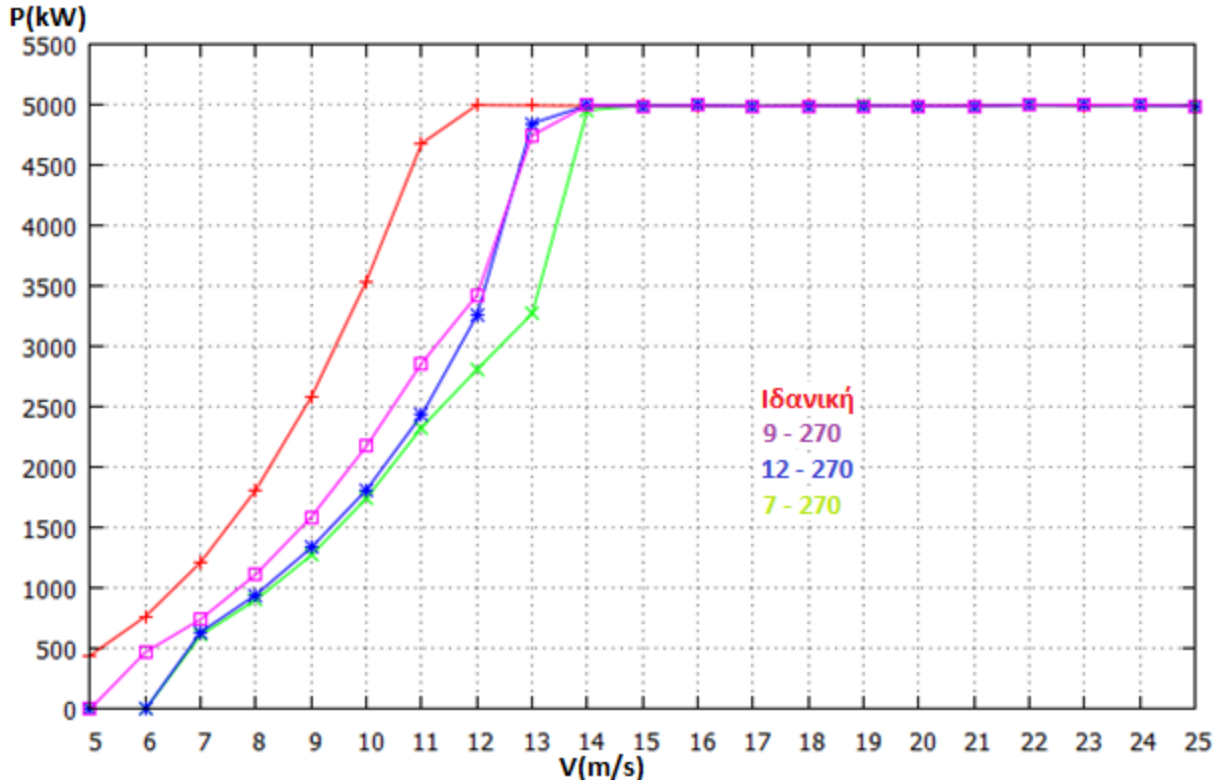
112.5^{o}

Σχ.3.α.61: Απεικόνιση ομόρρου στις 292.5^{o} και 270°

Όπως φαίνεται, η αλληλεπίδραση ομόρρου μεταξύ των μηχανών είναι έντονη και στις δύο αυτές διευθύνσεις. Παρατηρείται μάλιστα το γεγονός ότι στις 292.5, που, παρόλο που έχει την ίδια συχνότητα με τις 270, είναι ακόμα πιο επιβαρυμένη αφού η «απέναντί» της είναι χειρότερη από αυτήν της 270, δέχεται μεγαλύτερος αριθμός μηχανών ταχύτητα πάρκου. Ωστόσο, στις 270, όλες οι μηχανές που δέχονται ομόρρου βρίσκονται μακριά από την κεντρική γραμμή και δέχονται πολλαπλό ομόρρου, κάτι που, σύμφωνα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, επιφέρει μείωση στην ισχύ μόνο σε μεγάλες ταχύτητες, όπου όμως οι πιθανότητες ανέμου είναι μηδενικές σε αυτές τις διευθύνσεις και δεν επηρεάζουν την παραγόμενη ενέργεια. Αντίθετα, η απώλεια παραγωγής ενέργειας, για παράδειγμα στη μηχανή 12 στις 292.5 μοίρες, είναι πολύ μεγάλη, καθώς υπάρχει σε μικρές ταχύτητες ανέμου. Όλα αυτά φαίνονται αναλυτικά στα παρακάτω σχήματα, όπου απεικονίζονται οι καμπύλες των 3 πιο φορτισμένων μηχανών, στο πρώτο σχήμα στις 292.5 και στο δεύτερο στις 270 μοίρες, σε σχέση με την καμπύλη ισχύος αναφοράς:



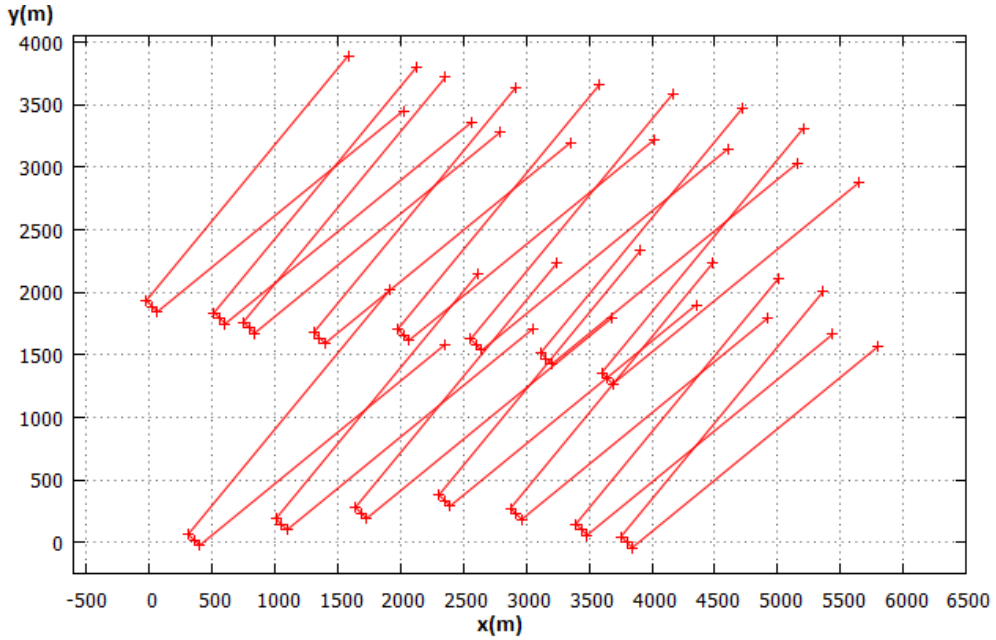
Σχ.3.α.62: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 2, 12 και 14 στις 292.5^{o}



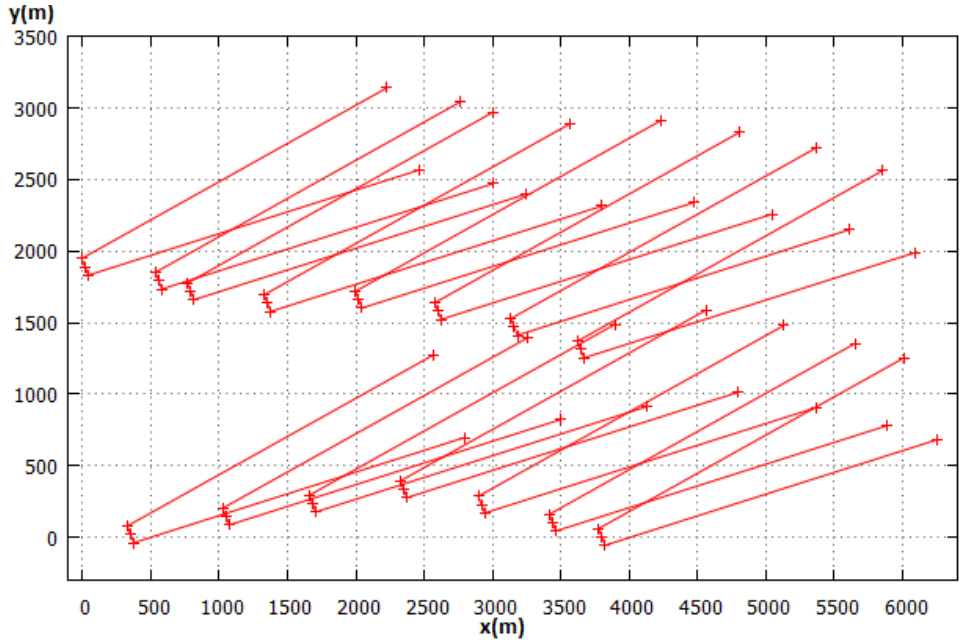
Σχ.3.α.63: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 7, 9 και 12 στις 270°

Στο Σχ.3.α.63, και οι 3 μηχανές βρίσκονται σχεδόν πάνω στην κεντρική γραμμή ομόρρου της μηχανής που επάγει σε αυτές. Επίσης, παρατηρούμε ότι η 12 είναι πολύ πιο κοντά στη μηχανή που επάγει σε αυτήν, από ότι οι άλλες δύο, για αυτό η παραγωγή της είναι, για μικρές ταχύτητες, η χαμηλότερη. Επιπρόσθετα, όλες δέχονται πολλαπλό ομόρρου και για αυτό το λόγο σε όλες τις ταχύτητες ανέμου παράγει περισσότερη ισχύ η 2 και λιγότερη η 12. Όσον αφορά, τώρα, τις 270 μοίρες, και οι τρεις μηχανές δέχονται πολλαπλό ομόρρου. Ωστόσο, η 7 βρίσκεται σχεδόν πάνω στην κεντρική γραμμή των 12 και 15, σε αντίθεση με τις άλλες δύο, και ιδίως τη 12, που βρίσκεται στην άκρη του ομόρρου των δύο μηχανών που επάγουν σε αυτήν. Για αυτό, παρατηρείται χαμηλότερη ισχύς σε όλες τις ταχύτητες ανέμου. Επίσης, η απόσταση της 12 από την 4 που επάγει πάνω της είναι πολύ μικρή, αλλά βρίσκεται πολύ μακριά από την κεντρική γραμμή του ομόρρου της, και για αυτό δεν έχει μεγάλη απώλεια ισχύος. Παρατηρούμε επίσης ότι, για μεγάλες ταχύτητες ανέμου, η 12 ξεπερνά σε ισχύ την 9, κάτι που οφείλεται στο μοντέλο αλληλεπίδρασης, καθότι η 12 δέχεται διπλό ομόρρου, ενώ η 9 τετραπλό, με αποτέλεσμα να «χάνει» ισχύ σε μεγάλες ταχύτητες.

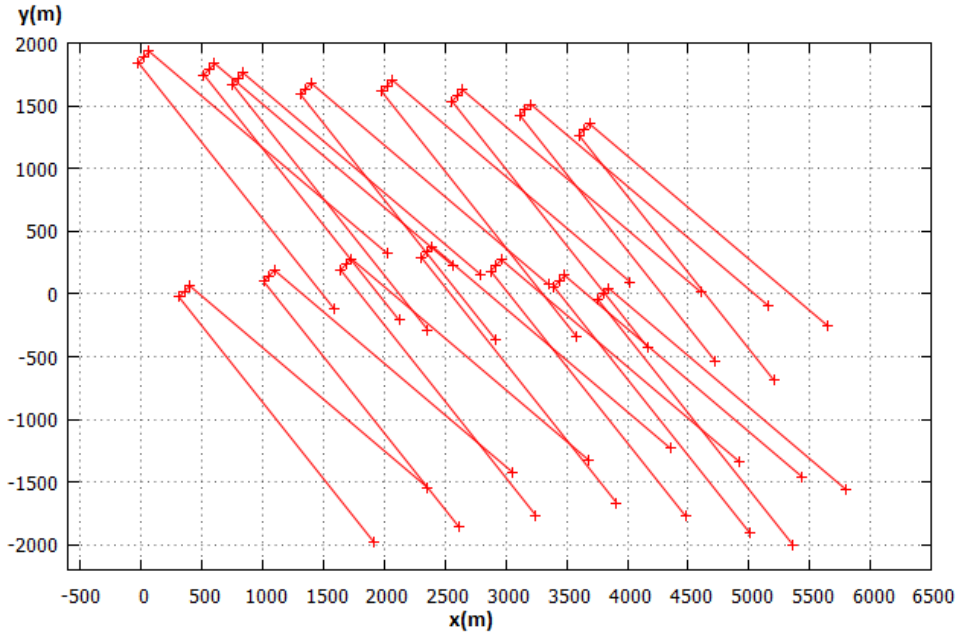
Σημαντική είναι και η απεικόνηση του ομόρρου στις διευθύνσεις 225, 247.5, 315 και 337.5 μοιρών, καθώς και σε αυτές τις διευθύνσεις φαίνεται από το Σχ.3.α.64 να υπάρχει αλληλεπίδραση ομόρρου:



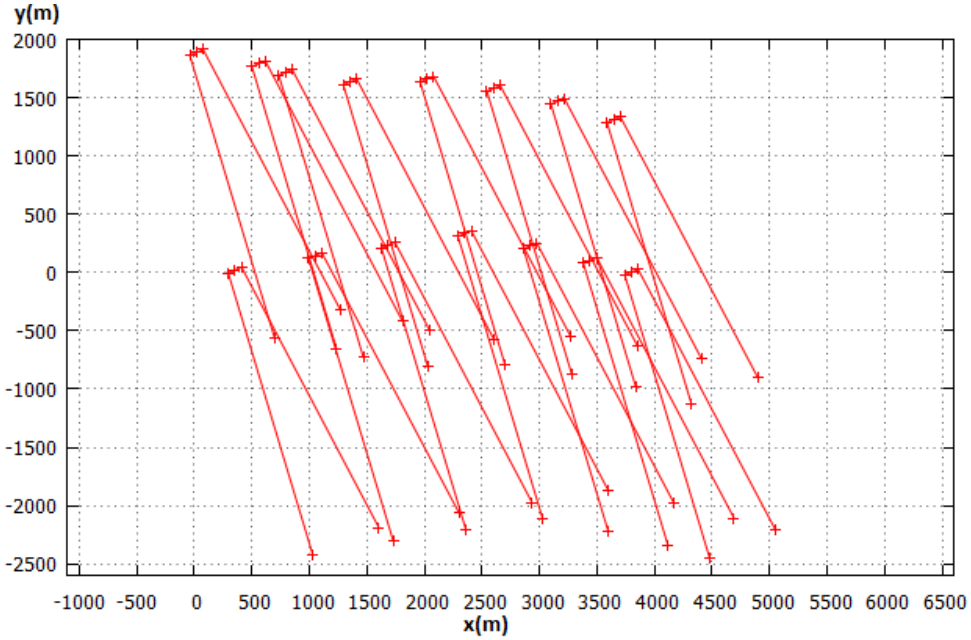
225°



247.5°



315°

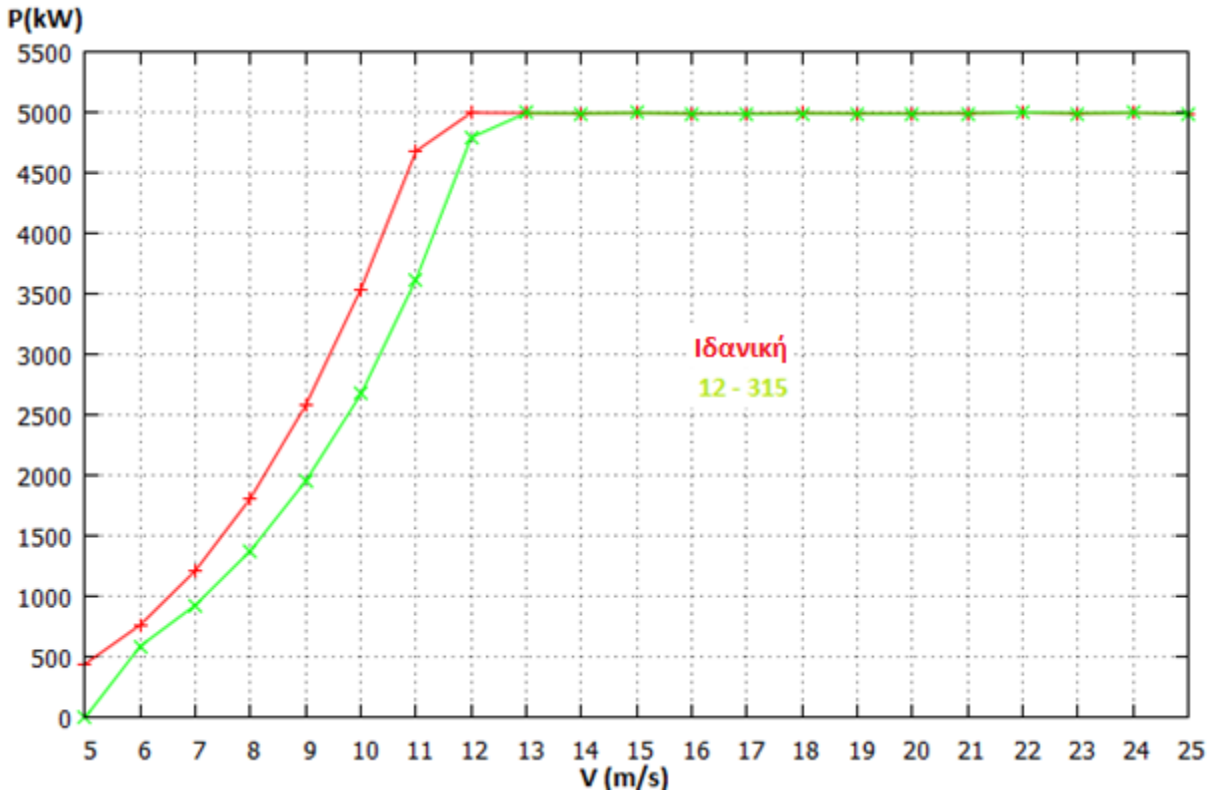


337.5°

Σχ.3.α.64: Απεικόνιση ομόρρου στις διευθύνσεις 225°, 247.5°, 315° και 337.5°

Υπάρχουν, λοιπόν, αλληλεπιδράσεις και σε αυτές τις διευθύνσεις, ωστόσο είναι πολύ μικρές σε σχέση με αυτές των μηχανών στις διευθύνσεις 292,5 και 270 μοιρών. Για να αποδειχθεί πόσο μικρές είναι, ένας καλός τρόπος είναι η παρεμβολή της καμπύλης ισχύος της πιο

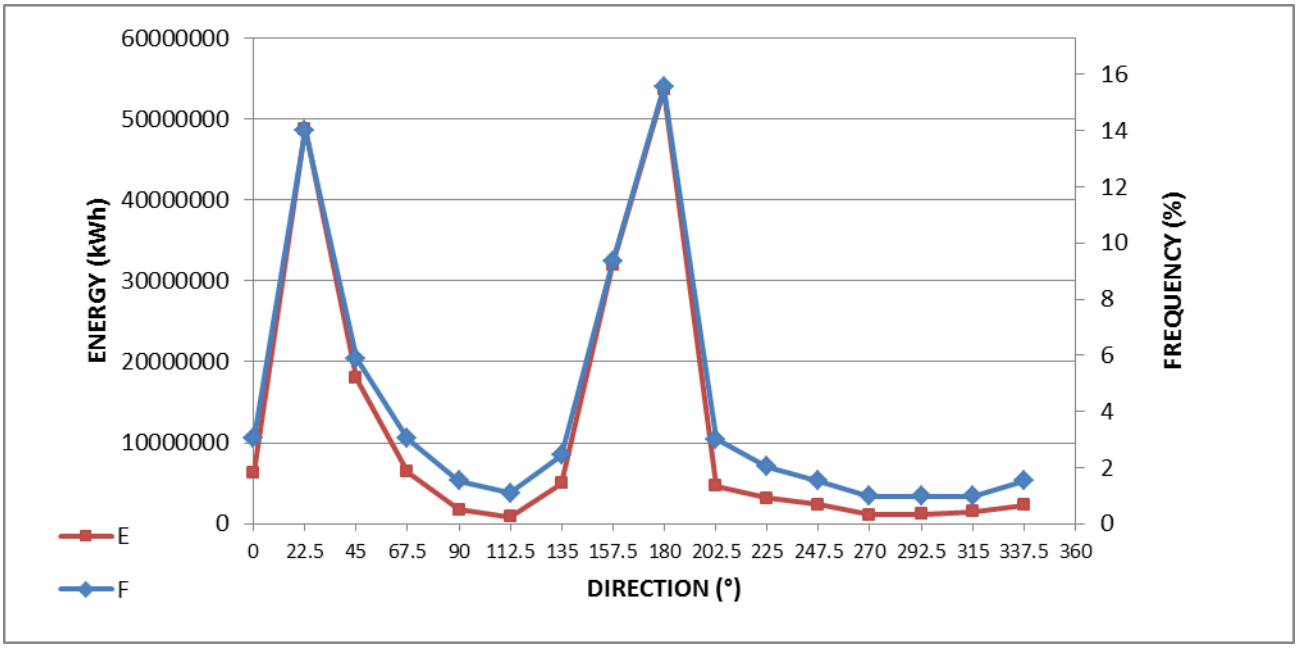
φορτισμένης μηχανής από όλες τις μηχανές σε αυτές τις 4 διευθύνσεις, δηλαδή της μηχανής 12 στις 315 μοίρες, σε σχέση με την ιδανική:



Σχ.3.α.65: Καμπύλη ισχύος της μηχανής 12 στις 315°

Είναι ευνόητο ότι η καμπύλη ισχύος της 12 στις 315 μοίρες, προσεγγίζει πολύ περισσότερο την ιδανική καμπύλη ισχύος από όσο πολλές μηχανές στις διευθύνσεις 292.5 και 270 μοιρών, ακόμα και αν δέχεται τον μεγαλύτερο ομόρρου από όλες τις μηχανές στις διευθύνσεις 225, 247.5, 315 και 337.5 μοιρών.

Ακολουθεί το διάγραμμα ενέργειας, συχνότητας – διεύθυνσης, το οποίο αποδεικνύει, όχι μόνο πια διεύθυνση αποδίδει την περισσότερη ενέργεια, αλλά και πια διεύθυνση αποδίδει την περισσότερη ενέργεια ανεξάρτητα, όμως, από το άθροισμα των συχνοτήτων της. Σε αυτό το σημείο παίζει βασικό ρόλο η κατανομή των συχνοτήτων μιας διεύθυνσης στο φάσμα των ταχυτήτων.



Σχ.3.α.66: Καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων και παραγωγής ενέργειας για την κάθε διεύθυνση

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες με τις τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας και τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας:

DIRECTION(°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)
180	15.55	53661837.72
22.5	14.03	48814238.91
157.5	9.33	32017646.15

Πίν.3.α.17: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.

DIRECTION(°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)/FREQUENCY (%)
22.5	14.03	3479275.76
180	15.55	3450922.04
157.5	9.33	3431687.69

Πίν.3.α.18: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας.

Και εδώ, όπως και στο πάρκο με τις 5 ανεμογεννήτριες, οι 3 διευθύνσεις όπου παράγεται το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας είναι οι δύο κυριότερες διευθύνσεις των 180 και 22.5 μοιρών και η διεύθυνση 157 μοιρών.

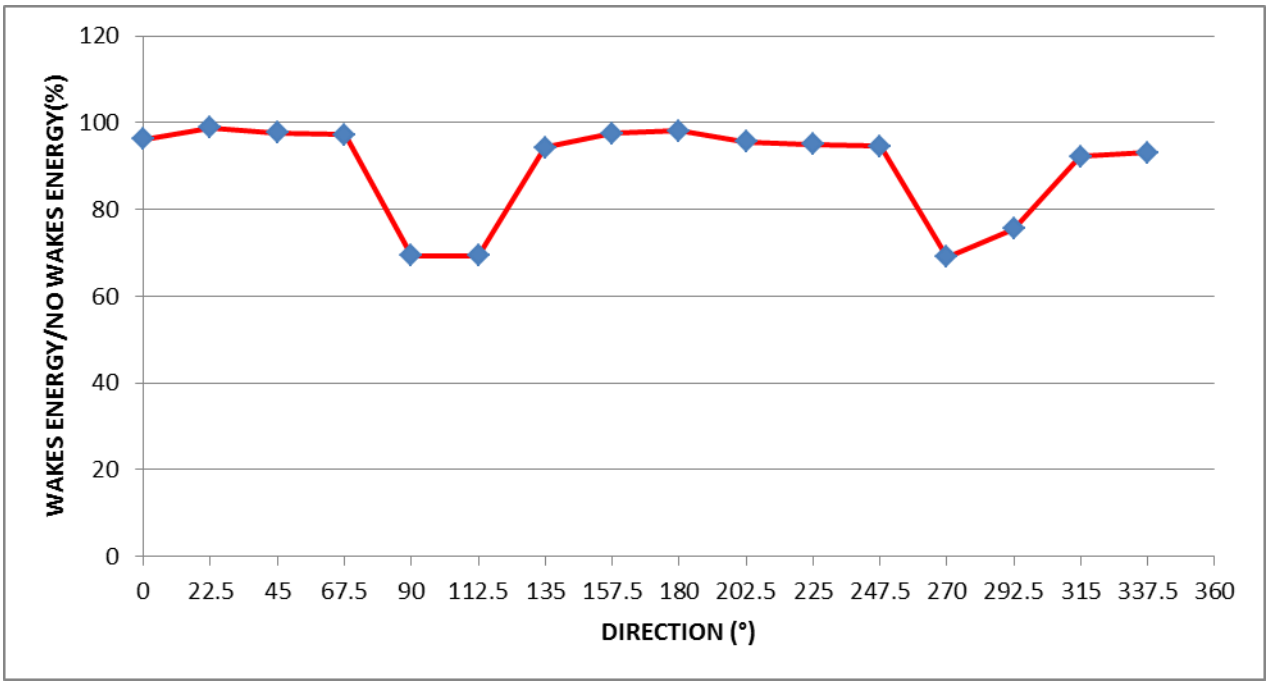
Όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας, η διεύθυνση των 157.5 μοιρών, είναι, πλέον, πίσω από τις άλλες δύο διευθύνσεις, όπως άλλωστε είχε προβλεφθεί για τα δύο μεγαλύτερα πάρκα των 15 και 40 μηχανών, ενώ σε αυτό των 5, ήταν δεύτερη με πρώτη την διεύθυνση των 22.5 μοιρών, η οποία και εδώ παραμένει πρώτη, όπως φαίνεται στον Πίν.3.α.18, αλλά και στο Σχ.3.α.66, καθώς είναι η μόνη διεύθυνση στην οποία η καμπύλη ενέργειας ξεπερνά την καμπύλη συχνότητας. Η μεταβολή αυτή για τη διεύθυνση των 157.5 μοιρών οφείλεται στο γεγονός ότι οι μηχανές δέχονται σε αυτό το πάρκο μεγαλύτερο ομόρρου σε αυτήν, από ότι στις δύο κύριες διευθύνσεις, ενώ στο πρώτο πάρκο, και στις διευθύνσεις όλες οι μηχανές δέχονταν μηδενικό ομόρρου. Έτσι, με τη λογική αυτή, αναμένεται στο μεγαλύτερο πάρκο των 40 ανεμογεννητριών ακόμα μεγαλύτερη διαφορά.

Μάλιστα, ενώ στο προηγούμενο πάρκο η διαφορά 22.5 και 180 σε παραγωγή ενέργειας ανά συχνότητα ήταν περίπου 2kWh, τώρα που τα ποσά σχεδόν τριπλασιάστηκαν (λίγο λιγότερο από τριπλάσια, καθώς υπάρχει ελάχιστος ομόρρους και στις δύο κύριες διευθύνσεις, (εντυπωσιακό όμως το πόσο λίγο λιγότερο από τριπλάσια!)), θα έπρεπε και η διαφορά να είναι περίπου 6kWh, αν η επίδραση ομόρρου ήταν η ίδια για τις μηχανές στις δύο διευθύνσεις. Είναι όμως περίπου 30 kWh, πράγμα που δείχνει ότι στις 180 μοίρες, αν και είναι η κυριότερη διέυθυνση, ο ομόρρους είναι ελάχιστα μεγαλύτερος. Η επιλογή αυτή του EASY οφείλεται μάλλον στο ότι αυτή η διάταξη συμφέρει τη συνολική αύξηση της απόδοσης, και όχι στο ότι το ζευγάρι διευθύνσεων είναι 22.5 - 202.5 είναι πιο σημαντικό από αυτό των 0-180, καθότι η αντίστοιχη σύγκριση στα ζευγάρια δίνει με διαφορά πρώτο το 0-180:

COUPLED DIRECTIONS	ENERGY(kWh)/FREQUENCY(%)
0 - 180	5535394.382
22.5 - 202.5	5024081.396

Πιν.3.α.19: Παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας στα 2 κυριότερα ζευγάρια διευθύνσεων

Ακολουθεί διάγραμμα ποσοστών ενέργειας προς το ποσοστό που θα παραγόταν αν δεν υπήρχε επίδραση ομόρρου:

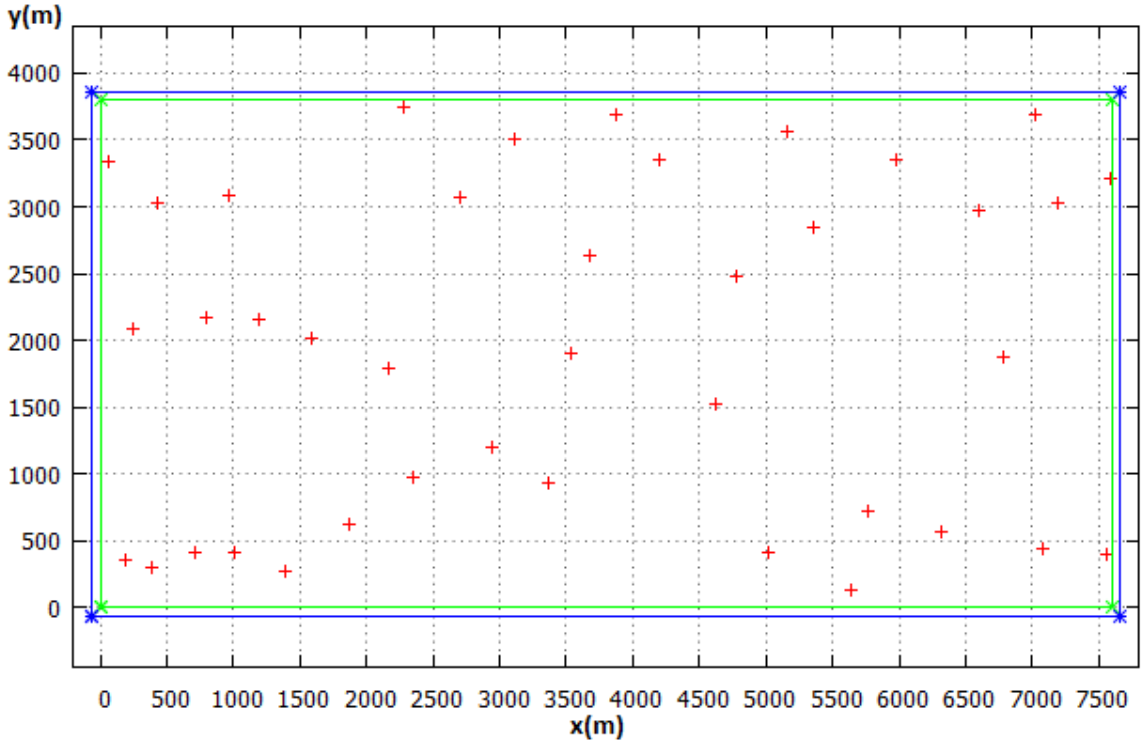


Σχ.3.α.67: Ποσσστό % αποδιδόμενης ενέργειας σε κάθε διεύθυνση προς την ενέργεια που θα αποδοδίταν χωρίς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανών

Και εδώ, φαίνεται η τελειότητα της τοποθέτησης καθώς, ναι μεν πλέον υπάρχουν απώλειες σε όλες τις διευθύνσεις, ωστόσο οι μεγάλες απώλειες είναι στα 2 ασθενέστερα ζευγάρια διευθύνσεων, 112.5-292.5 και 90-270.

Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας σε αυτό το πάρκο των 15 ανεμογεννητριών, για όλες τις διευθύνσεις και ταχύτητες ανέμου και για όλες τις μηχανές, με τις συγκεκριμένες βέλτιστες για παραγωγή ενέργειας συντεταγμένες που επέλεξε ο EASY, ανέρχεται στις 188753726 kWh, με CF_{2B}=0.28730 < CF_{1B}=0.29421, καθώς με τριπλάσιο αριθμό μηχανών, είναι απόλυτα λογικό να υπάρχουν μεγαλύτερες επιδράσεις ομόρρου μεταξύ των μηχανών, και, φυσικά, αναμένεται περαιτέρω πτώση του CF στο μεγάλο πάρκο με τις 40 ανεμογεννήτριες, για τον ίδιο λόγο. Επιπλέον, το ΑΕΠ και, ως εκ τούτου, το CF, είναι αισθητά μικρότερα από τα αντίστοιχα του πάρκου με τις 15 μηχανές και το ρόδο Α, για γνωστούς λόγους.

Το υποκεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την ανάλυση της χωροθέτησης των 40 ανεμογεννητριών σε ενεργό χωράφι διαστάσεων 7600m επί 3800m, με το δεύτερο ρόδο ανέμου. Παρακάτω, λοιπόν, φαίνεται η τοποθέτηση των 40 μηχανών, έτσι όπως προέκυψε με τη χρήση του EASY:



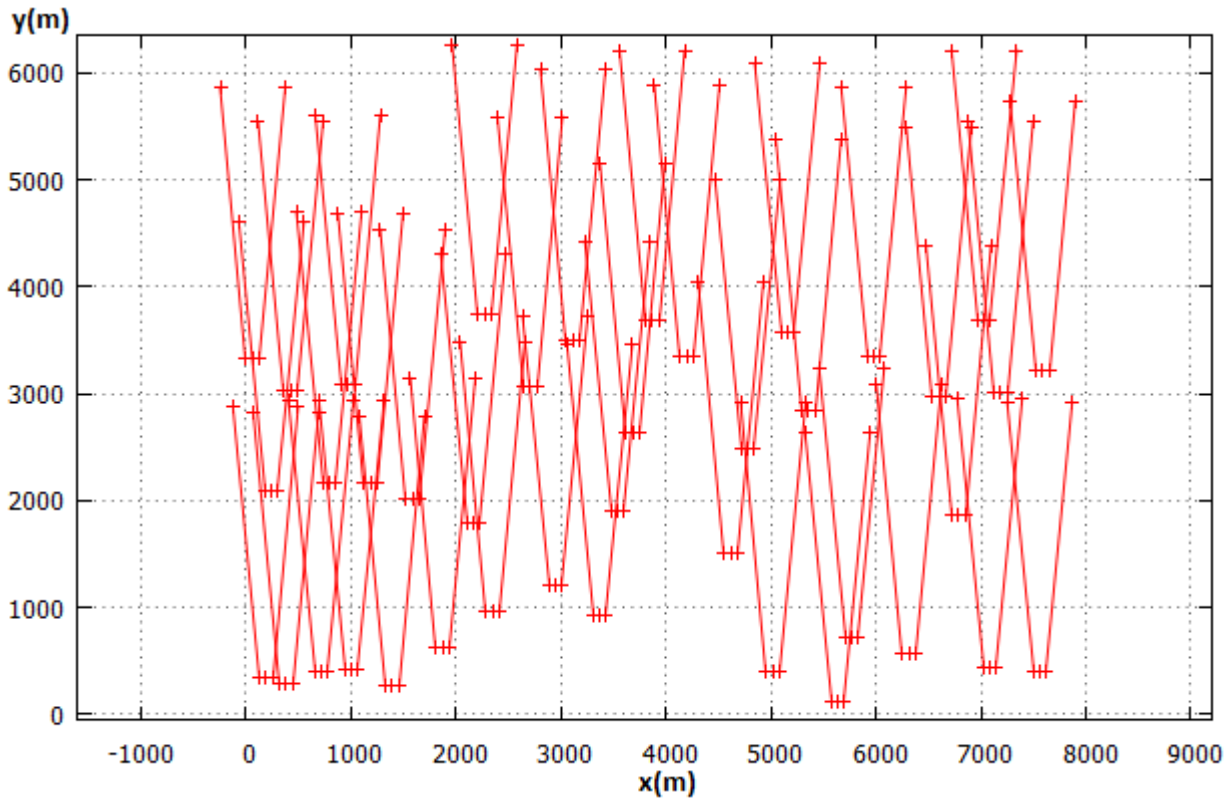
Σχ.3.α.68: Βελτιστοποιημένο πάρκο 40 ανεμογεννητριών με το ρόδο ανέμου Β.

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	x(m)	y(m)
1	3369.080	931.800
2	1005.284	412.133
3	5769.667	724.951
4	424.951	3021.037
5	379.354	295.695
6	5357.632	2850.489
7	5635.323	123.679
8	3868.102	3683.855
9	5978.865	3347.750
10	1389.139	270.842
11	63.405	3335.519
12	2704.110	3069.276
13	7560.078	399.804
14	2163.894	1792.368
15	1185.421	2157.632
16	2944.423	1200.098
17	2349.217	967.025
18	6786.693	1867.025

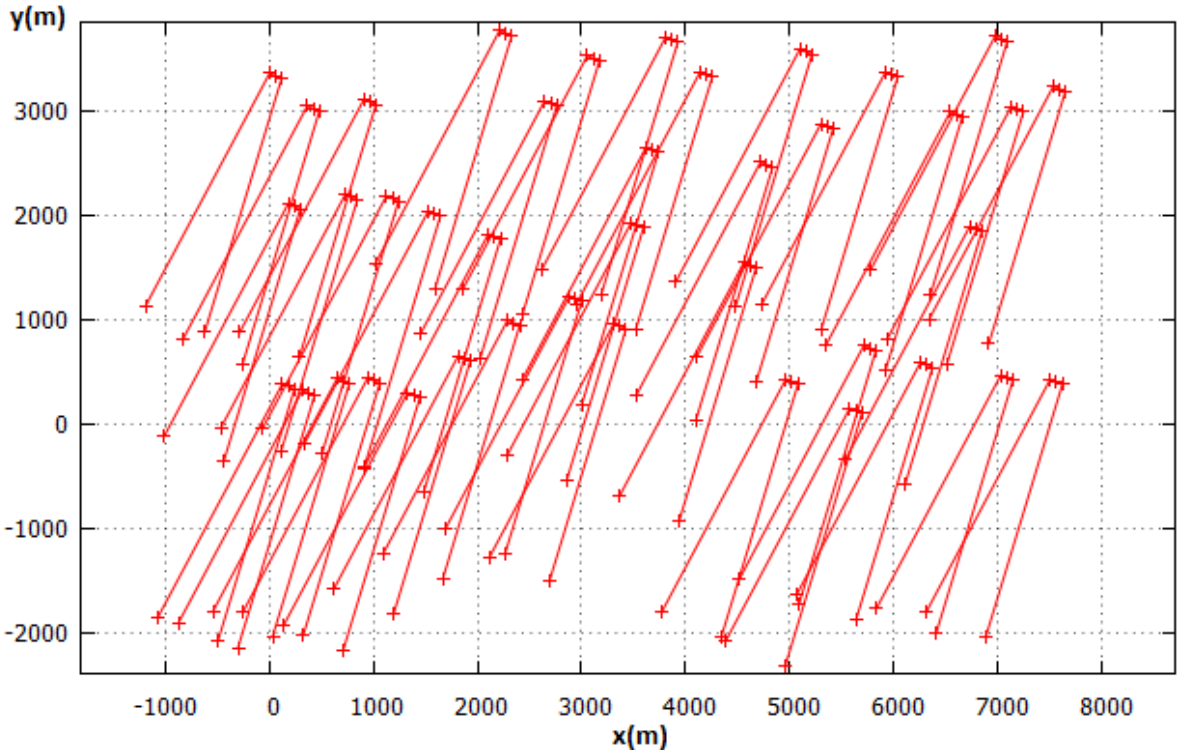
19	3537.378	1904.599
20	6313.796	562.525
21	3114.012	3503.620
22	7187.476	3020.450
23	6599.511	2964.775
24	4618.004	1518.004
25	2272.407	3745.205
26	790.509	2173.190
27	7030.724	3690.411
28	713.601	410.568
29	4777.984	2484.540
30	241.781	2082.583
31	7589.041	3209.883
32	4199.902	3353.327
33	5155.871	3565.949
34	5021.722	402.838
35	969.276	3084.638
36	1588.063	2015.166
37	7084.540	437.671
38	3681.115	2630.039
39	1874.853	625.636
40	186.008	355.577

Πιν.3.α.20: Συντεταγμένες x,y των ανεμογεννητριών

Σίγουρα υπάρχουν, με μια πρώτη ματιά, αλληλεπιδράσεις μηχανών σε όλες τις διευθύνσεις ανέμου. Έτσι, χρησιμότατη εδώ κρίνεται η απεικόνηση των ομόρρων των μηχανών στις πιο ενδιαφέρουσες διευθύνσεις. Ας ξεκινήσουμε με τις δύο κυριότερες διευθύνσεις, την πρώτη των 180 μοιρών και τη δεύτερη των 22.5 μοιρών:

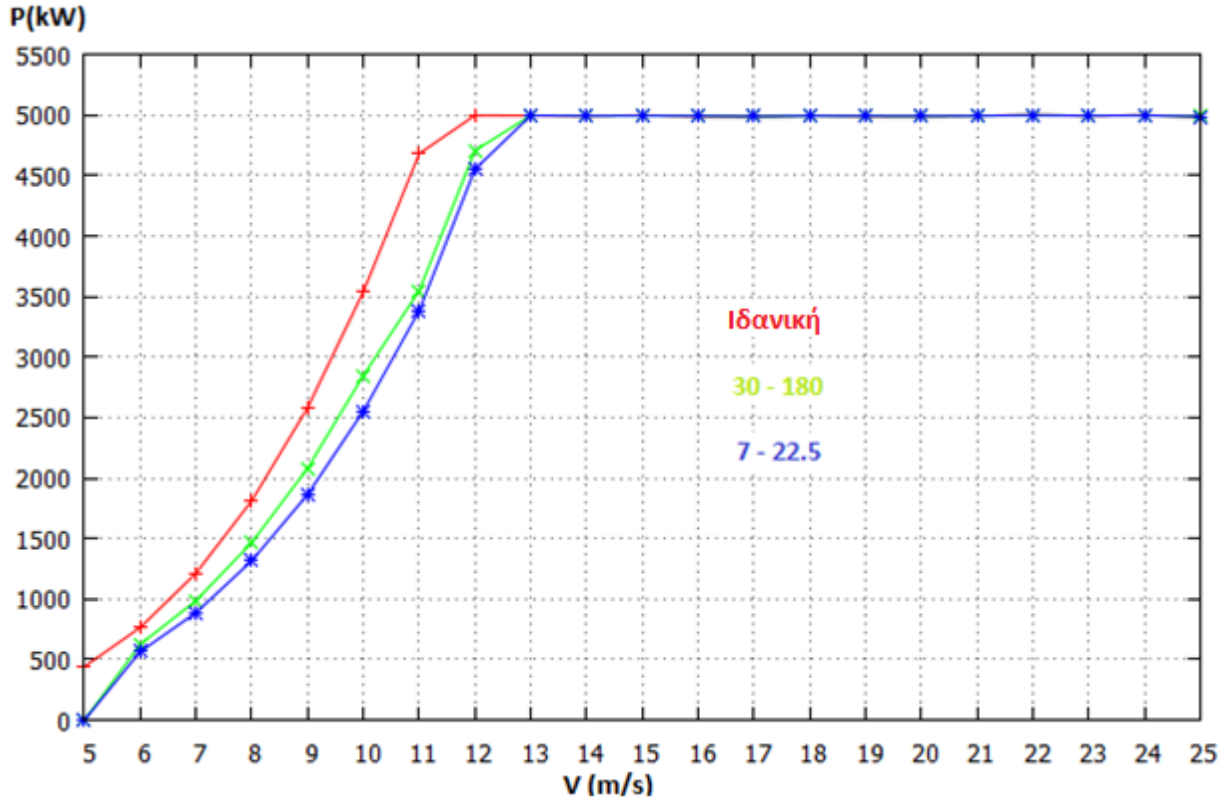


Σχ.3.α.69:Απεικόνιση ομόρρου στις 180°



Σχ.3.α.70: Απεικόνιση ομόρρου στις 22.5°

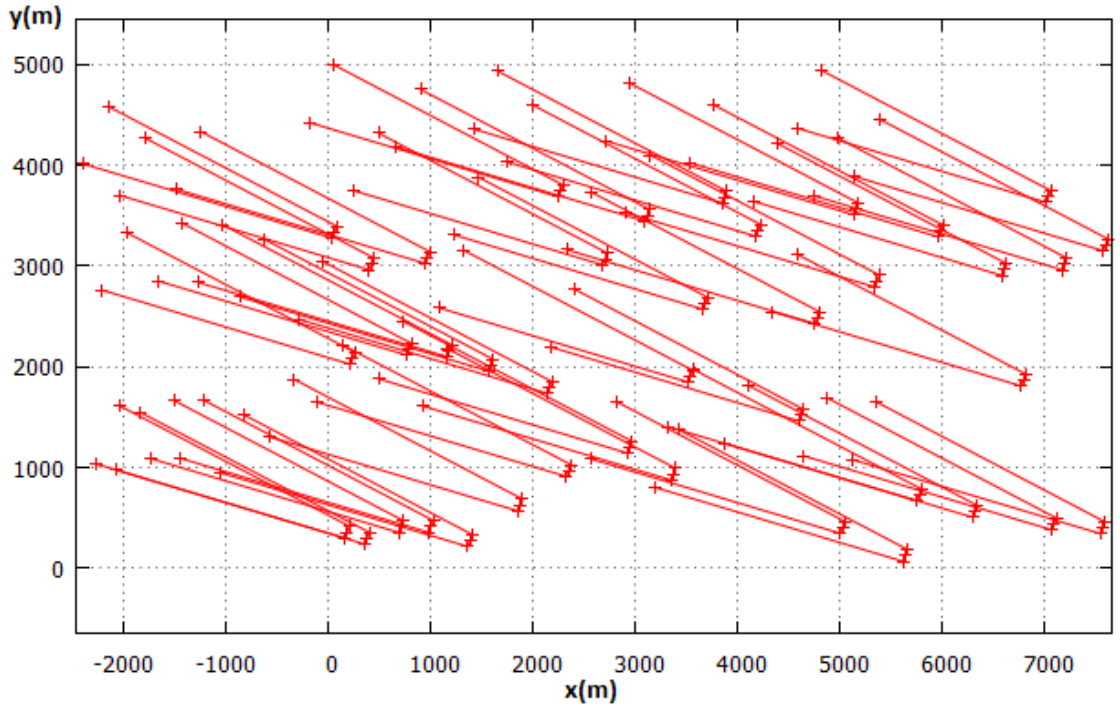
Και στις δύο περιπτώσεις, υπάρχει εμφανής αλληλεπίδραση σε πολλές μηχανές. Και στις δύο διευθύνσεις, αλλά κυρίως στην κυριότερη των 180 μοιρών,ωστόσο, οι αποστάσεις μεταξύ των αλληλεπιδρώντων μηχανών είναι πολύ μακρινές και, στις περιπτώσεις που είναι κοντινές είναι πολύ μακριά από την κεντρική γραμμή του ομόρρου της μηχανής που επάγει, και έτσι, η απώλεια ισχύος είναι πολύ μικρή. Επίσης, άξιο αναφοράς είναι ότι δεν υπάρχουν μηχανές που να δέχονται πολλαπλό ομόρρου, ώστε να μη χάνεται ισχύς στις υψηλές ταχύτητες ανέμου που έχουν μη μηδενική συχνότητα σε αυτές τις διευθύνσεις, κάτι που θα προκαλούσε πλήγμα στην παραγωγή ενέργειας. Για του λόγου το αληθές, θα παρεμβληθεί και η καμπύλη ισχύος της πιο φορτισμένης μηχανής σε κάθε μία από αυτές τις δύο διευθύνσεις, συγκριτικά με την ιδανική καμπύλη ισχύος:



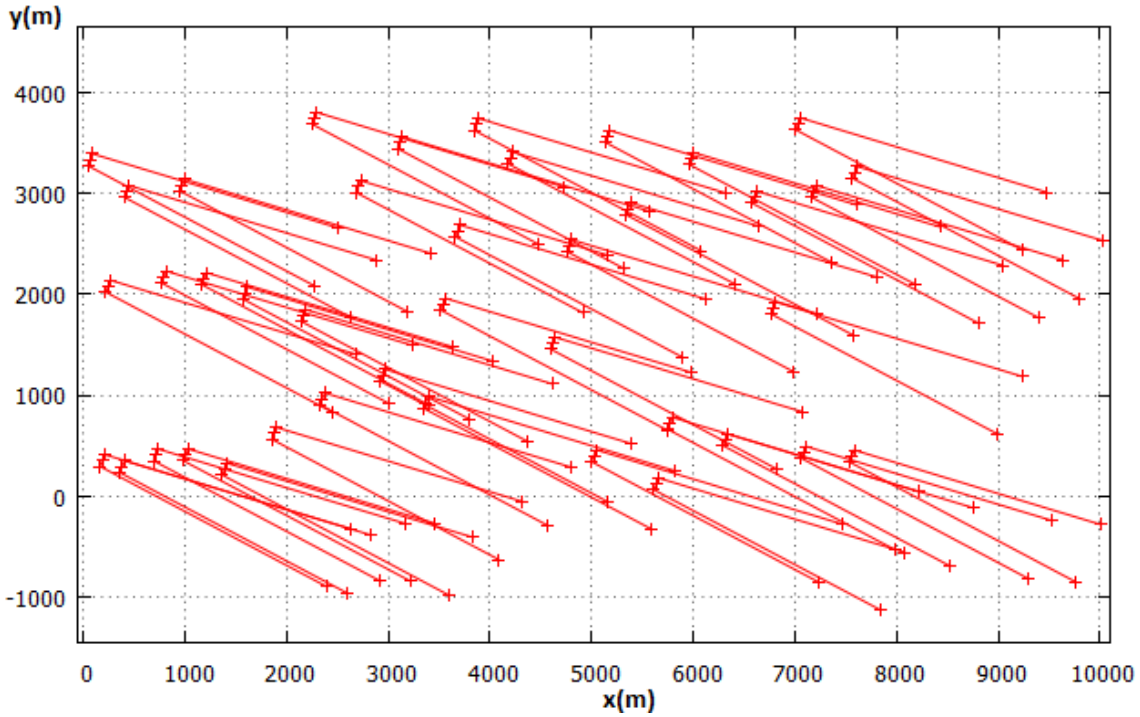
Σχ.3.α.71: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 30 στις 180° και 7 στις 22.5°.

Έτσι, λοιπόν, μέχρι στιγμής, φαίνεται ότι ο EASY έκανε σωστή επιλογή συντεταγμένων των μηχανών, επιβαρύνοντας όσο το δυνατόν λιγότερο τις μηχανές από επίδραση ομόρρου στις δύο κυριότερες διευθύνσεις .

Ακολουθεί η απεικόνηση του ομόρρου στις δύο διευθύνσεις του ασθενέστερου ζευγαριού διευθύνσεων 112.5-292.5:



Σχ.3.α.72: Απεικόνιση ομόρρου στις 112.5°

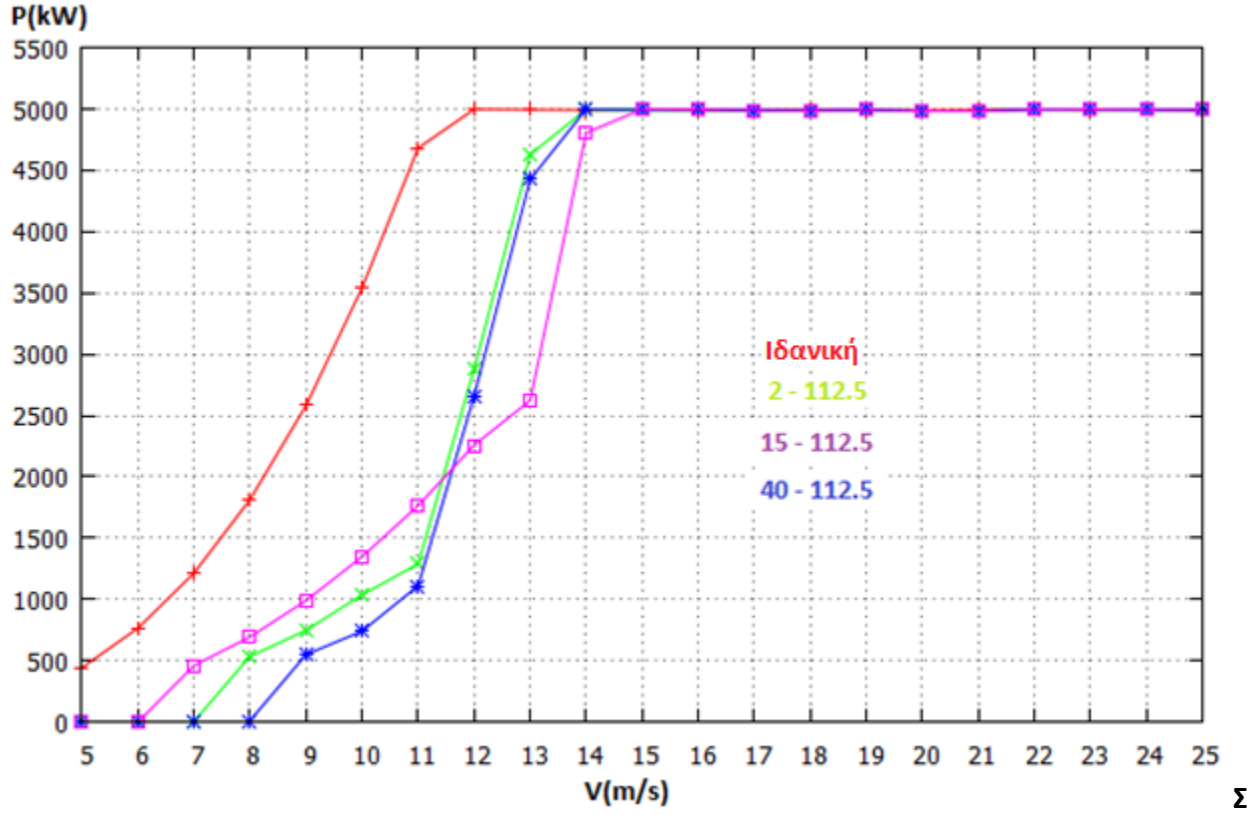


Σχ.3.α.73: Απεικόνιση ομόρρου στις 292.5°

Και στις δύο περιπτώσεις, η απώλεια ισχύος σε πολλές μηχανές είναι τεράστια, καθότι, δεν είναι μόνο πολύ μικρές οι αποστάσεις, αλλά και είναι τοποθετημένες ακριβώς η μία πίσω από

την άλλη, άρα πιο κοντά στην κεντρική γραμμή του ομόρρου, άρα δέχονται ταχύτητα με ακόμα μεγαλύτερο έλλειμα, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στις μηχανές 2, 40 στις 112.5 μοίρες και στη μηχανή 5 στις 292.5 μοίρες. Επιπρόσθετα, υπάρχουν και μηχανές που, εκτός από το ότι είναι κοντά και στο κέντρο του ομόρρου της μηχανής που της επάγει, δέχεται και πολλαπλό ομόρρου, από δύο, ή και περισσότερες ανεμογεννήτριες, όπως η 5 στις 112.5 μοίρες και οι 10 και 36 στις 292.5 μοίρες. Βέβαια, στις διευθύνσεις αυτές συμφέρει η ύπαρξη πολλαπλού ομόρρου, ώστε να παράγεται περισσότερη ισχύς σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου που έχουν μη μηδενική συχνότητα, και να χάνεται ισχύς σε υψηλές ταχύτητες ανέμου που έχουν μηδενική συχνότητα.

Κι εδώ θα γίνει η παρεμβολή της καμπύλης ισχύος των 3 πιο φορτισμένων μηχανών, σε κάθε μία από αυτές τις δύο διευθύνσεις, συγκριτικά με την ιδανική:

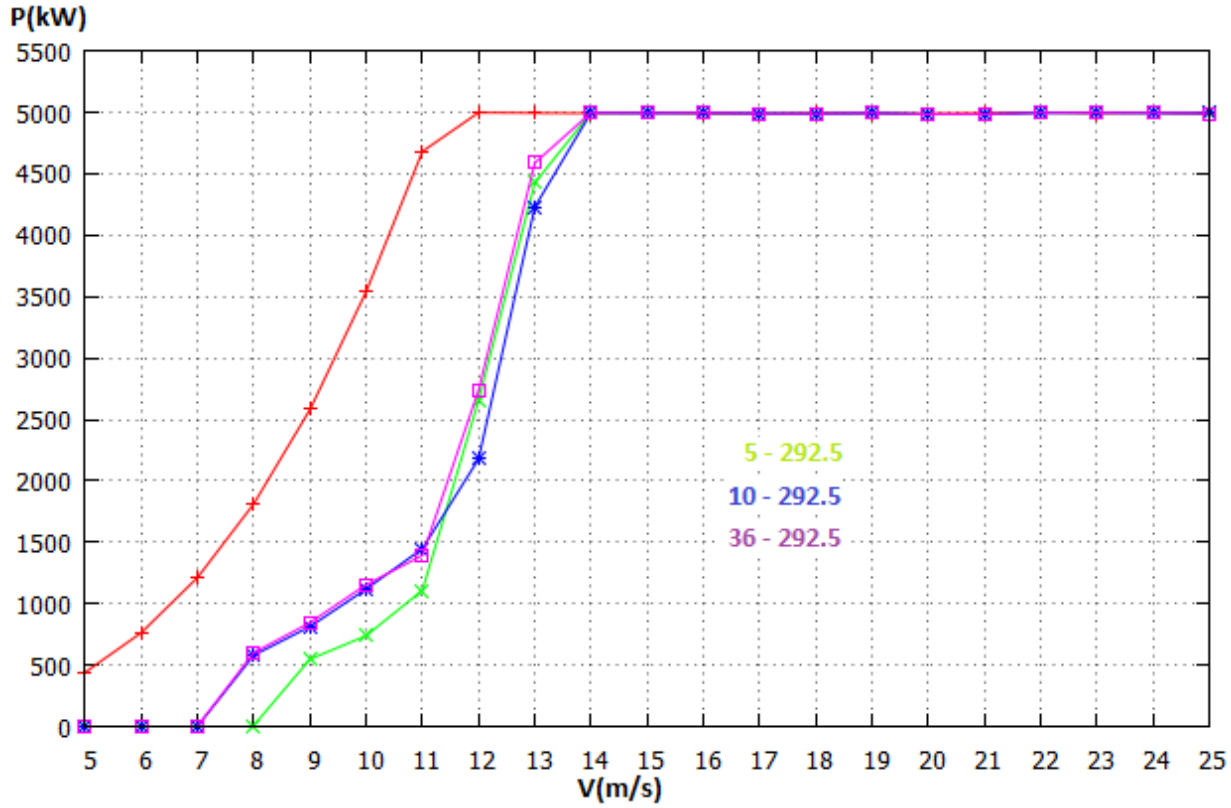


Σ

χ.3.α.74: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 2, 15 και 40 στις 112.5°

Συμπεραίνεται εύκολα ότι, από τις μηχανές 2 και 40 που δέχονται απλό ομόρρου και βρίσκονται πάνω στην κεντρική γραμμή του, η καμπύλη ισχύος εξαρτάται μόνο από την απόσταση που έχουν από τις μηχανές 10 και 5 αντίστοιχα, και επειδή η 2 είναι πιο μακριά από τη 10 από ότι η 40 από την 5, είναι σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων πιο πάνω από την 40 (πριν

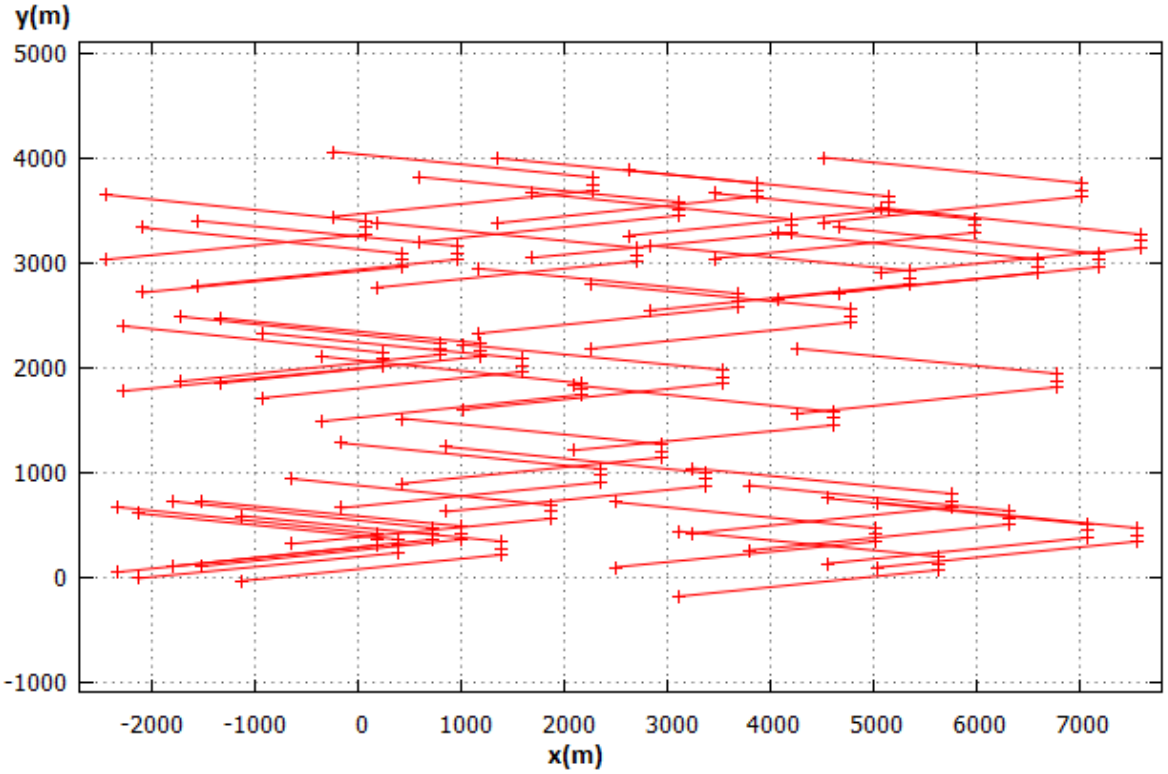
σταθεροποιηθεί η ισχύς, προφανώς). Όσον αφορά την 15, δέχεται διπλό ομόρρου, οπότε, ναι μεν υπερισχύει σε μικρές ταχύτητες ανέμου, σε μεγάλες, όμως, καταλήγει τελευταία σε απόδοση. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε αυτές τις διευθύνσεις συμφέρει ο πολλαπλός ομόρρους, καθότι δεν ενδιαφέρει η ισχύς σε υψηλές ταχύτητες, αφού έχουν μηδενική πιθανότητα. Για τις 292.5:



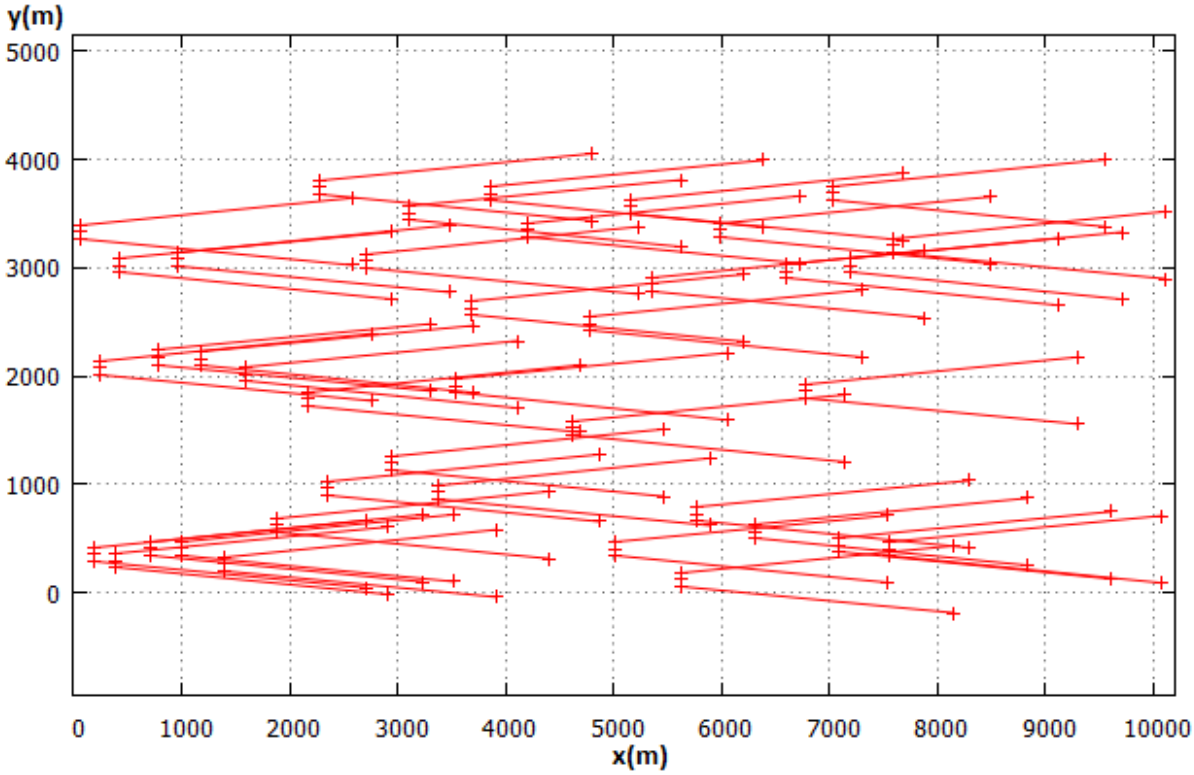
Σχ.3.α.75: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 5, 10 και 36 στις 292.5°

Η μηχανή 5, καταρχήν, δέχεται από τη 40 την ίδια επίδραση που δεχόταν η 40 από την 5 στις 112.5 μοίρες, και λόγω μικρής απόστασης, αποδίδει μηδενική ισχύ μεχρι και στα 8m/s ταχύτητα πάρκου. Ωστόσο, επειδή δέχεται απλό ομόρρου, η ισχύς μετά αυξάνεται σχετικά γρήγορα. Οι 10 και 36, όμως, που δέχονται πολλαπλό ομόρρου, βρίσκονται περίπου στα ίδια επίπεδα, αφού, και από το Σχ.3.α.75, οι επιδράσεις ομόρρου που έχουν είναι περίπου ίδιες. Ωστόσο, 10 δέχεται λίγο εντονότερα τον ομόρρου της 28 από ότι η 36 τον ομόρρου της 26, με αποτέλεσμα την όχι πολύ καλή απόδοση σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Έντονες αλληλεπιδράσεις φαίνεται να υπάρχουν στο ζευγάρι διευθύνσεων 90-270, καθότι από το Σχ.3.α.68 πολλές ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες ώστε να επάγουν ομόρρου σε άλλες κατά αυτές τις διευθύνσεις. Παρακάτω παρατίθεται και η απεικόνηση του ομόρρου τους:

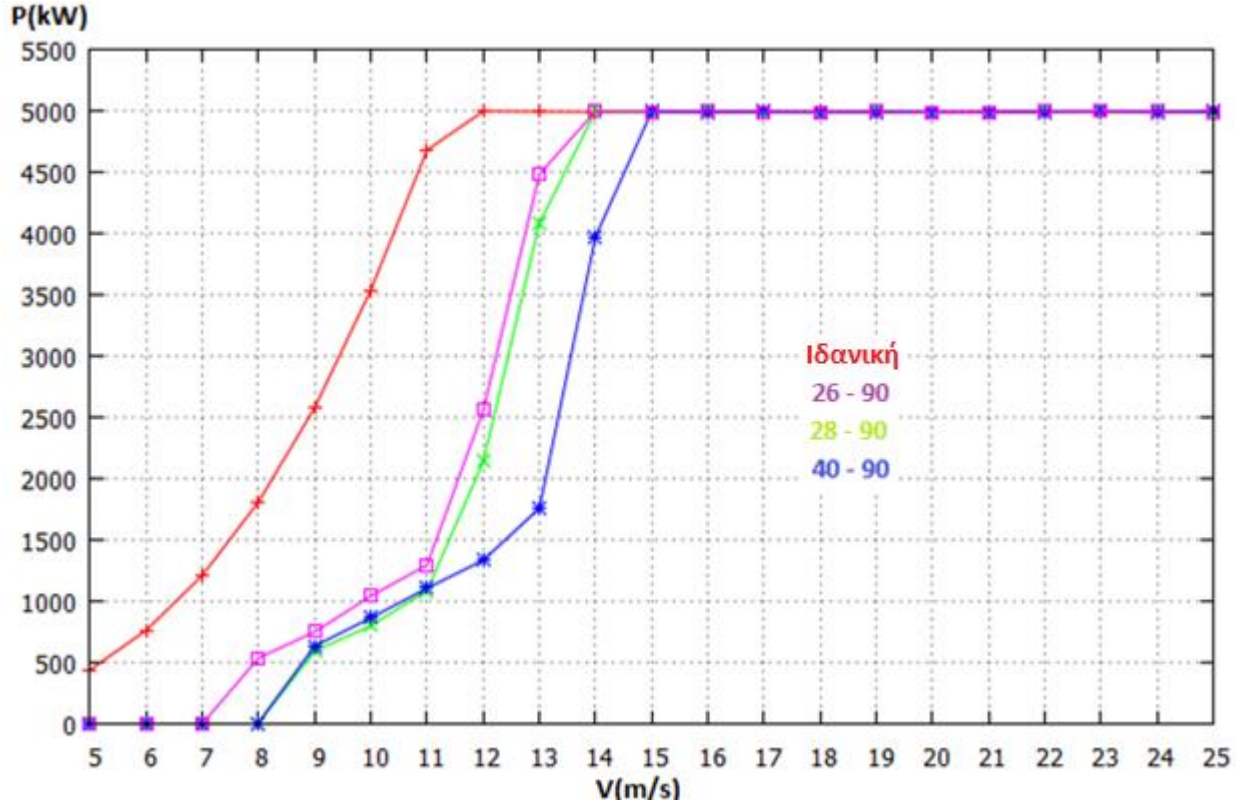


Σχ.3.α.76: Απεικόνιση ομόρρου στις 90°



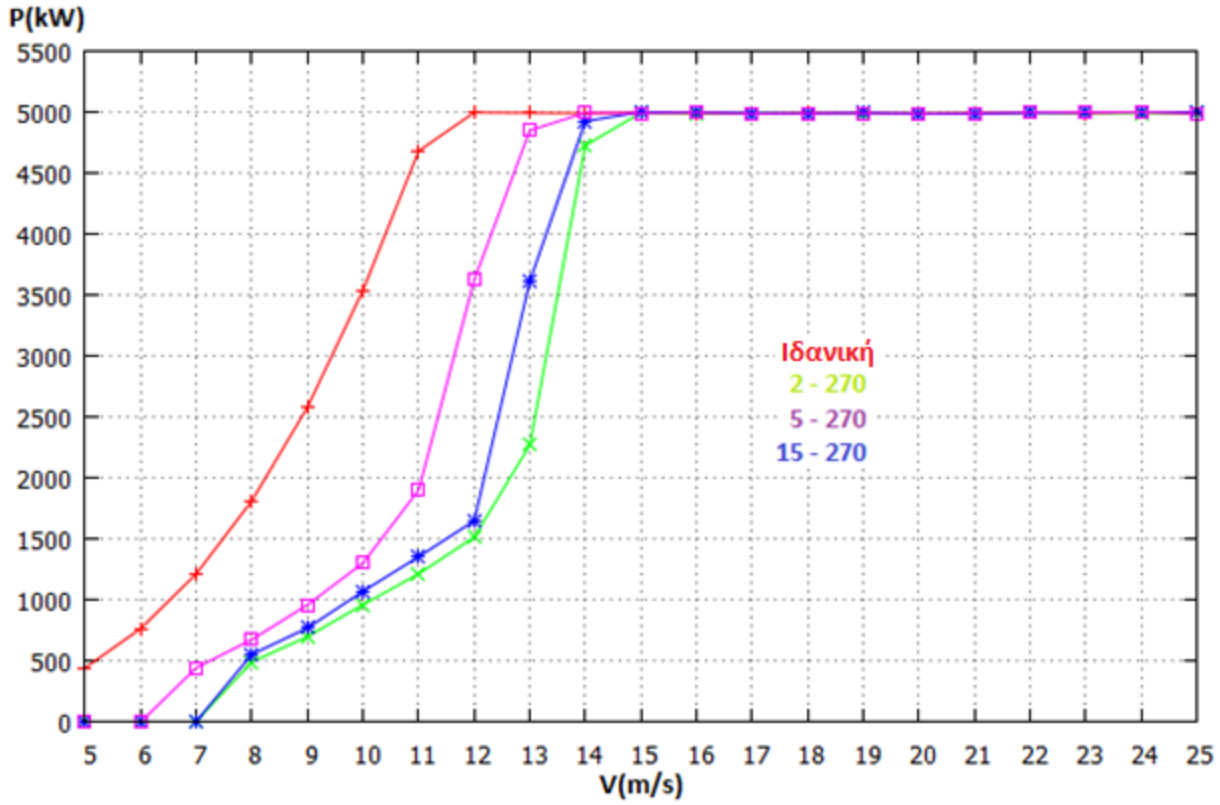
Σχ.3.α.77: Απεικόνιση ομόρρου στις 270°

Μάλιστα, σύμφωνα με αποτελέσματα του κώδικα, και ιδίως στις 90 μοίρες, οι αλληλεπιδράσεις είναι πιο έντονες από κάθε άλλη διεύθυνση. Θα παρατεθούν, και εδώ, οι καμπύλες ισχύος των 3 πιο φορτισμένων μηχανών σε σχέση με την ιδανική, στις 90 και στις 270 μοίρες:



Σχ.3.α.78: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 26, 28 και 40 στις 90°

Από το Σχ.3.α.76 , και οι 3 μηχανές δέχονται πολλαπλό ομόρρου, και μάλιστα η μηχανή 40 από 4 μηχανές. Οι μηχανές 28 και 40 είναι πολύ κοντά στην τελευταία μηχανή που τους επάγει, και για αυτό μέχρι και για άνεμο πάρκου ταχύτητας 8m/s αποδόδουν μηδενική ισχύ. Ωστόσο, επειδή η 40 δέχεται τετραπλό ομόρρου, ενώ η 28 διπλό, είναι λίγο πιο αποδοτική για μικρές ταχύτητες ανέμου. Σε μεγάλες ταχύτητες, όμως, υστερεί πολύ σε σχέση με την 28. Όσον αφορά τη μηχανή 26, είναι πιο μακριά από την τελευταία μηχανή που της επάγει, για αυτό αποδίδει ισχύ σε χαμηλότερη ταχήτητα από τις άλλες, και δέχεται και αυτή διπλό ομόρρου, όπως και η 28, για αυτό και η διαφορά τους παραμένει περίπου αμετάβλητη και είναι σε όλες τις ταχύτητες έως ότου σταθεροποιηθεί η ισχύς πιο αποδοτική από την 28.



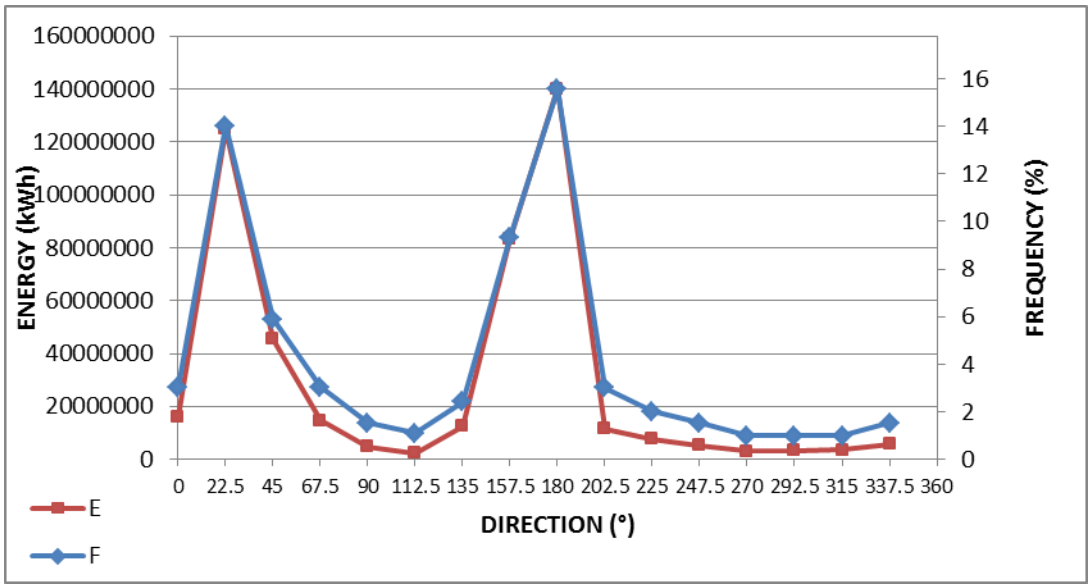
Σχ.3.α.79: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 2, 5 και 15 στις 270°

Εδώ τα πράγματα είναι αρκετά ξεκάθαρα, καθώς οι μηχανές 2 και 15 δέχονται είναι αρκετά κοντά και πάνω στην κεντρική γραμμή της τελευταίας μηχανής που τους επάγει για αυτό και αποδίδουν από 8m/s και άνω, ενώ και η 15, αλλά ειδικά η 2, δέχονται πολλαπλό ομόρρου, με αποτέλεσμα να απομακρύνονται ακόμα περισσότερο από την καμπύλη ισχύος της 5, η οποία δέχεται απλό ομόρρου, και, παρότι είναι πάρα πολύ κοντά στη 40 που της επάγει, δεν είναι αρκετά κοντά στην κεντρική γραμμή του ομόρρου της ώστε να επηρεαστεί πολύ.

Επίσης, από αποτελέσματα του κώδικα, μόλις 10 μηχανές συνολικά στις διευθύνσεις 90 και 270 δέχονται μηδενική επίδραση ομόρρου (από σύνολο 80 και στις δύο διευθύνσεις!), ενώ υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός μηχανών που αρχίζει να αποδίδει στα 7m/s. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι, με σκοπό να κερδίσει περισσότερη ενέργεια από τις κυριότερες διευθύνσεις, ο EASY «αναγκάζεται» να επιβαρύνει περισσότερο το δεύτερο, και όχι το πρώτο ασθενέστερο ζευγάρι που είναι οι 112.5-292.5 μοίρες. Φαίνεται, λοιπόν, ότι με 40 ανεμογεννήτριες στο πάρκο, δεν είναι εύκολη υπόθεση να ικανοποιηθούν όλοι οι στόχοι.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η μηχανή 40 στη διεύθυνση των 90 μοιρών είναι η μηχανή η οποία, σε όλα τα πάρκα και με τα 2 ρόδα ανέμου, δέχεται την μεγαλύτερη επίδραση ομόρρου από κάθε άλλη μηχανή.

Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα ενέργειας, συχνότητας – διεύθυνσης, ώστε να συμπεράνουμε πια είναι η διεύθνση που αποδίδει και τη μεγαλύτερη ενέργεια, αλλά και τη μεγαλύτερη ενέργεια ανά μονάδα συχνότητας:



Σχ.3.α.80: Καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων και παραγωγής ενέργειας για την κάθε διεύθυνση

Παρακάτω ακολουθούν πίνακες με τις τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας και τις 3 πρώτες διευθύνσεις σε παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας:

DIRECTION (°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)
180	15.55	140159734.2
22.5	14.03	124944419.6
157.5	9.33	83391456.87

Πιν.3.α.21: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας

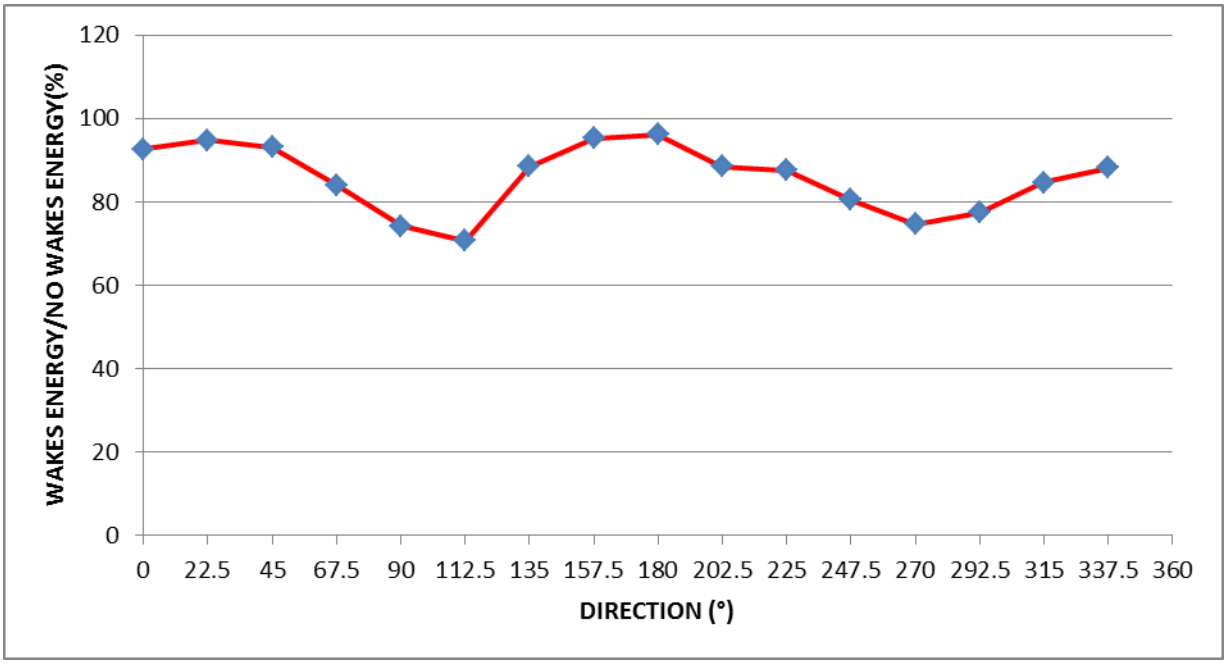
DIRECTION (°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)/FREQUENCY (%)
180	15.55	9013487.727
157.5	9.33	8937991.09
22.5	14.03	8905518.146

Πιν.3.α.22: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας

Όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, η σειρά είναι αμετάβλητη και στα 3 πάρκα των 5, 15 και 40 ανεμογεννητριών.

Όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας, η διέυθυνση των 180 μοιρών είναι και εκεί ψηλότερα από όλες, όπως είχε προβλεφθεί εξ' αρχής, καθώς έχει, πλέον, εμφανώς τις μικρότερες επιδράσεις ομόρρου στις μηχανές, όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα ομόρρου και καμπυλών ισχύος των μηχανών, στα Σχ.3.α.69 και Σχ.3.α.71 Παραδόξως, δεύτερη δεν είναι η διεύθυνση των 22.5 μοιρών, αλλά αυτή των 157.5. Αυτό συνέβη διότι, πιθανότατα, οι μηχανές στη διεύθυνση των 22.5 μοιρών επιβαρύνθηκαν πιο πολύ από τις άλλες δύο, από πλευράς επίδρασης ομόρρου, ώστε, χάνοντας σε αυτήν ένα μικρό ποσό ενέργειας, θα κερδίθηκε ένα μεγαλύτερο σε άλλες.

Ακολουθεί διάγραμμα ποσοστών ενέργειας προς το ποσοστό που θα παραγόταν αν δεν υπήρχε επίδραση ομόρρου:



Σχ.3.α.81: Ποσσστό % αποδιδόμενης ενέργειας σε κάθε διεύθυνση προς την ενέργεια που θα αποδοδίταν χωρίς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανών

Ακόμα και με τόσο μεγάλο αριθμό μηχανών, και εδώ οι μεγαλύτερες απώλειες είναι στα ασθενέστερα ζευγάρια διευθύνσων, ενώ οι μικρότερες στις 3 ισχυρότερες διευθύνσεις.

Τελικά, στο πάρκο των 40 μηχανών με το δεύτερο ρόδο ανέμου, η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας σε όλες τις διευθύνσεις, ταχύτητες ανέμου και μηχανές, στις θέσεις που επέλεξε ο EASY, ανέρχεται στις 484707548 kWh, νούμερο πολύ χαμηλότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο πάρκο με το πρώτο ρόδο ανέμου, πράγμα που, αφού ο EASY έχει κάνει τη βέλτιστη επιλογή συντεταγμένων των μηχανών, οφείλεται στο ότι η διαφορά ασθενών και κυρίων διευθύνσεων είναι μικρή σε σχέση με του πρώτου ρόδου. Επίσης, το $CF_{3B} = 0.27666 < CF_{2B} < CF_{1B}$, κάτι που ήταν, φυσικά, αναμενόμενο, καθώς όσο μεγαλώνει ο αριθμός των μηχανών τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες ισχύος των μηχανών λόγω ομόρρου.

3.α.3

Στα δύο προηγούμενα υποκεφάλαια, αντικείμενο μελέτης ήταν η τοποθέτηση ανεμογεννητριών σε ορθογώνιο χωράφι, με γνώμονα το εκάστοτε ρόδο ανέμου A και B, ώστε η παραγωγή ενέργειας στο αιολικό πάρκο να είναι η μέγιστη δυνατή, με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών να επιλέγονται από καμπύλες λειτουργίας, και έτσι, να είναι αμετάβλητα για την κάθε ταχύτητα ανέμου. Στην επίτευξη του σκοπού της βελτιστοποίησης, συνέβαλε ο εξελικτικός αλγόριθμος EASY, ο οποίος, και στα τρία ορθογώνια χωράφια μεγέθους 5, 15 και 40 ανεμογεννητριών, επέλεξε τις συντεταγμένες για τις μηχανές που έδωδαν τη μέγιστη ετήσια παραγωγή ενέργειας στο πάρκο (το μέγιστο CF).

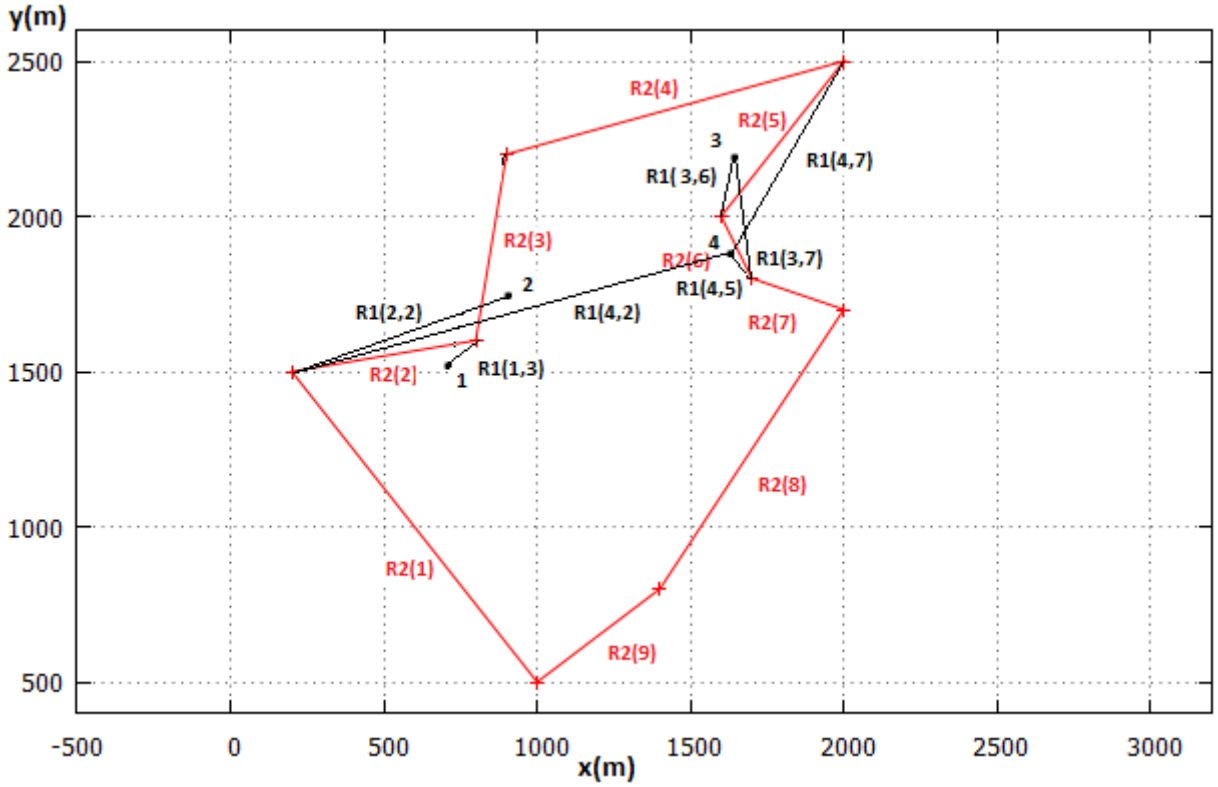
Στο παρόν υποκεφάλαιο 3.α.3, θα μελετηθεί ακριβώς το ίδιο αντικείμενο, δηλαδή η βέλτιστη τοποθέτηση των ανεμογεννητριών για παραγωγή μέγιστης συνολικής ισχύος σε όλες τις κατευθύνσεις, ταχύτητες ανέμου και μηχανές, με το πρώτο ρόδο ανέμου A, με όμοιο τρόπο επιλογής χαρακτηριστικών λειτουργίας των μηχανών, δηλαδή μέσα από την καμπύλη λειτουργίας POWER - Ct, με τη διαφορά ότι το χωράφι δεν είναι ορθογωνίου σχήματος, αλλά τυχαίου πολυγωνικού σχήματος. Επιλέχθηκε να μελετηθεί μόνο μία περίπτωση με 15 ανεμογεννήτριες.

Κατ’ αρχήν, στα ορθογώνια χωράφια δεν αναγράφονταν στον κώδικα οι διαστάσεις τους, αλλά ορίζονταν από το εύρος των τιμών που μπορούσαν να πάρουν οι συντεταγμένες των μηχανών. Για παράδειγμα, στο χωράφι με τις 5 ανεμογεννήτριες, το εύρος των συντεταγμένων x όλων των μηχανών ήταν 0-1900m, άρα και η μία διάσταση του χωραφιού στον άξονα x, και των συντεταγμένων y όλων των μηχανών 0-950m, άρα και η άλλη διάσταση του ενεργού χωραφιού στον άξονα y. Στην περίπτωση του χωραφιού τυχαίου πολυγωνικού σχήματος, η οριοθέτηση των διαστάσεων του χωραφιού δεν γίνεται από τον EASY, αλλά γράφεται μέσα στον κώδικα, ένα πλήθος σημείων που ορίζουν εξωτερικά το χωράφι. Επιλέχθηκε το πλήθος αυτό να είναι15 σημεία, τα οποία ενωμένα μεταξύ τους ορίζουν, φυσικά, το τυχαίο σχήμα του χωραφιού.

Στη διαδικασία εύρεσης βέλτιστων συντεταγμένων στο χωράφι τυχαίου σχήματος, η δυσκολία έγκειται στο να οριστεί εύρος τιμών των συντεταγμένων των ανεμογεννητριών και στους δύο άξονες στον EASY, για να γίνει η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Για να ξεπεραστεί, λοιπόν, αυτή η δυσκολία, αποφασίστηκε το εύρος τιμών που θα γραφεί στον EASY (ως μεταβλητές σχεδιασμού), να ορίζει ένα τετράγωνο χωράφι που περιβάλλει το χωράφι τυχαίου σχήματος, και να προστεθεί τμήμα στον κώδικα το οποίο, σε συνδυασμό με τον πίνακα περιορισμών του EASY, να απορρίπτει λύσεις του EASY που είναι αποτέλεσμα εκλογής συντεταγμένων των ανεμογεννητριών που δίνουν σημεία εκτός του χωραφιού τυχαίου σχήματος που είναι η επιτρεπτή περιοχή για τοποθέτηση ανεμογεννητριών.

Οι γραμμές του κώδικα που προστέθηκαν ούτως ώστε να γίνει αυτό εφικτό, βασίζονται στην παρακάτω λογική:

Ορίζονται, αρχικά, διανύσματα R2(j) = [R2X(j),R2Y(j)], όπου j ο αριθμός του εξωτερικού σημείου, τα οποία έχουν ως αρχή ένα εξωτερικό σημείο από τα 15 του πάρκου και ως τέλος το επόμενο σημείο. Άρα, με αυτό τον τρόπο, δημιουργούνται 15 διανύσματα R2(j). Έπειτα ορίστηκαν διανύσματα R1(i , j) = [R1X(i , j) ,R1Y(i , j)], όπου i ο αριθμός της ανεμογεννήτριας και j ο αριθμός του διανύσματος, με αρχή τα σημεία των ανεμογεννητριών και τέλος την αρχή των R2(j), και αφού οι μηχανές είναι 15, 15 διανύσματα R1(i , j), γαι κάθε μία μηχανή. Εάν, λοιπόν, το εξωτερικό γινόμενο RGH(i , j) = R1X(i , j) · R2Y(j) – R1Y(i , j) · R2X (i , j) του R1 της κάθε μηχανής με το κάθε ένα R2 διάνυσμα από τα 15 που ορίζουν το χωράφι είναι αρνητικό ως αλγεβρική τιμή, τότε το σημείο της ανεμογεννήτριας βρίσκεται εντός των ορίων του πάρκου. Αυτή η λύση όμως, είναι ορθή μόνο στην περίπτωση τυχαίου κυρτού πολυγωνικού σχήματος, καθότι, εάν η, προς το εσωτερικό του χωραφιού, γωνία δύο ή περισσοτέρων συνεχόμενων διανυσμάτων είναι αμβλεία η λύση αυτή παρου σιάζει πρόβλημα, καθώς μπορεί να εμφανίσει θετικό εξωτερικό γινόμενο για κάποιο σημείο που, όμως, βρίσκεται εντός ορίων του πάρκου. Για παράδειγμα, ένα τυχαίο μη κυρτό χωράφι:



Σχ.3.α.82: Πάρκο τυχαίου μη κυρτού σχήματος

Το εξωτερικό γινόμενο RGH (i , j) = R1X (i , j) · R2Y (j) – R1Y(i , j) · R2X (i , j) για τα ζευγάρια (i , j):

(1,3) , (2,2) , (3,6) , (3,7) , (4,2) , (4,5) και (4,7) είναι θετικό, παρότι, όμως, αυτά βρίσκονται εντός του χωραφιού. Έτσι, δεν είναι κατάλληλη λύση για πολυγωνικό χωράφι οποιουδήποτε σχήματος, αλλά μόνο κυρτού σχήματος.

Επειδή η λύση του προβλήματος με εξωτερικά διανύσματα δεν είναι γενική, βρέθηκε τρόπος για να καλυφθεί κάθε περίπτωση πάρκου. Ο τρόπος αυτός, βασίζεται στη λογική ότι, για να βρίσκεται μία μηχανή εντός ορίων του πάρκου, πρέπει το y της να βρίσκεται μεταξύ των τιμών του y των ευθειών που ενώνουν τα εξωτερικά σημεία του χωραφιού ενδιάμεσα στα x των οποίων βρίσκεται το x του. Για να υλοποιηθεί αυτό το σκεπτικό, ελέγχεται αν, όπως έχουν αριθμηθεί τα εξωτερικά σημεία του χωραφιού, το x της μηχανής είναι ανάμεσα στο x της ευθείας που βρίσκεται από πάνω του ή ανάμεσα στο x της ευθείας που βρίσκεται από κάτω του. Αν ισχύει ένα από τα δύο, τότε για τη συγκεκριμένη εξωτερική ευθεία δημιουργείται τοπικό σύστημα αξόνων με τις παρακάτω σχέσεις, όπου (x_1,y_1) και (x_2,y_2) τα σημεία που ορίζουν ευθεία:

$$DS = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$$cos\beta = \frac{x_2 - x_1}{DS}$$

$$sin\beta = \frac{y_2 - y_1}{DS}$$

Άρα, στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων τα x και y δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$x^L = x \cdot cos\beta + y \cdot sin\beta$$

$$y^L = -x \cdot sin\beta + y \cdot cos\beta$$

Ως εκ τούτου, αν το y^L είναι θετικό, προκύπτει σε κάθε περίπτωση, ότι το σημείο βρίσκεται εκτός των ορίων του αιολικού πάρκου. Ο παραπάνω έλεγχος γίνεται, προφανώς, για όλα τις εξωτερικές ευθείες, για κάθε ανεμογεννήτρια.

Παρ' όλα αυτά, αποφασίστηκε να γίνει βελτιστοποίηση πάρκου κυρτού πολυγωνικού σχήματος, καθότι είναι απλούστερη και αρκεί για να βγουν σημαντικά συμπεράσματα. Έτσι, η λύση της οριοθέτησης του πάρκου με τα εξωτερικά γινόμενα κατέστη δυνατη, αφού το χωράφι είναι κυρτό και δεν αποκλείονται αποδεκτά σημεία για τοποθέτηση ανεμογεννητριών.

Άλλο ένα ζήτημα που κάνει τη διαδικασία βελτιστοποίησης ακόμα δυσκολότερη στο πάρκο αυτό, είναι ότι, με κάποιο τρόπο, πρέπει οι ανεμογεννήτριες, εκτός από το να είναι εντός των ορίων του, να απέχουν από αυτά τουλάχιστον μία ακτίνα απόσταση, ειδάλλως θα υπάρχουν σε ορισμένες διευθύνσεις τμήματα των πτερυγίων που θα βγαίνουν εκτός των ορίων. Για το σκοπό αυτό, προστέθηκε στον κώδικα ο τύπος που υπολογίζει την απόσταση όλων των εξωτερικών ευθειών που προκύπτουν από την ένωση των εξωτερικών σημείων, από την κάθε ανεμογεννήτρια. Η απόσταση αυτή, δεν πρέπει να γίνει μικρότερη της μίας ακτίνας, δηλαδή των 63m, σε κάθε περίπτωση.

Ύστερα από αυτή την παρέμβαση, θα αναλυθεί το «στήσιμο» του EASY για τη βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου πάρκου. Δόθηκαν οι παρακάτω συντεταγμένες εξωτερικών σημείων στον κώδικα, για τη δημιουργία του χωραφιού:

Point No	x(m)	y(m)
1	1500.0	350.0
2	1300.0	410.0
3	1000.0	560.0
4	600.0	900.0
5	150.0	1800.0
6	550.0	3200.0
7	900.0	4000.0
8	2000.0	5200.0
9	3500.0	5750.0
10	5450.0	4550.0
11	5950.0	3600.0
12	5700.0	2050.0
13	4100.0	900.0
14	3300.0	500.0
15	1900.0	340.0

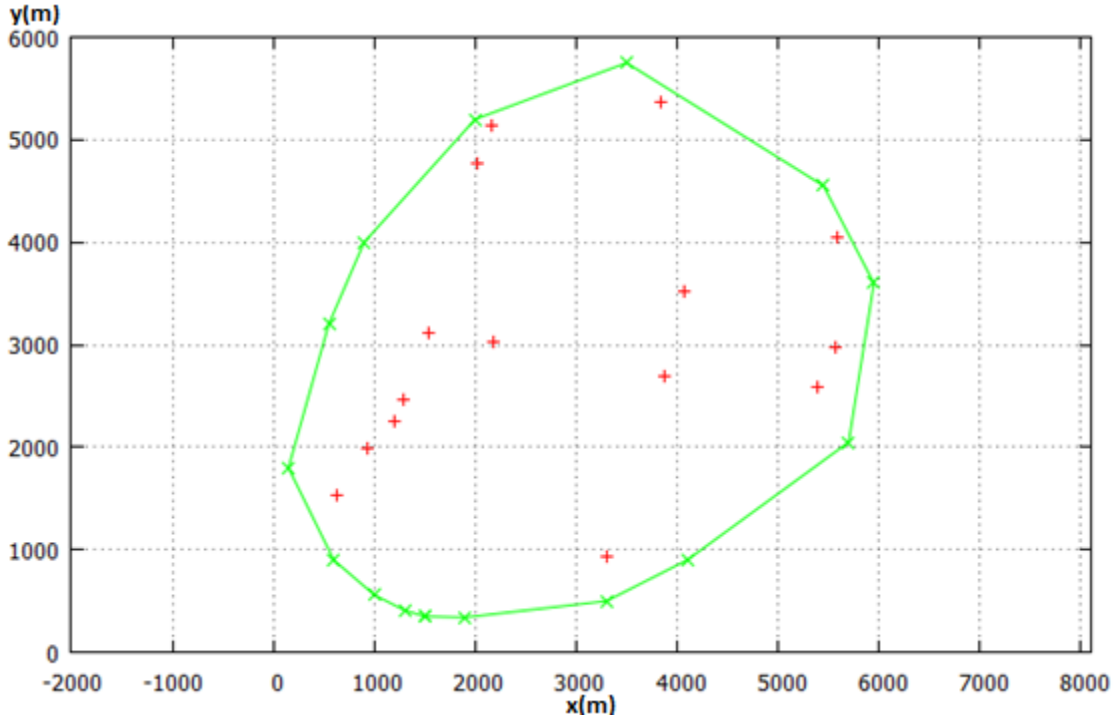
Πίν.3.α.23: Εξωτερικά σημεία κυρτού πάρκου

Από τον παραπάνω Πιν.3.α.23, ισχύει ότι όλα τα x και y είναι μεγαλύτερα του 0 και μικρότερα του 6000. Οι μεταβλητές σχεδιασμού (design variables), που είναι 30, αφού οι ανεμογεννήτριες είναι 15 και κάθε μία έχει 2 μεταβλητές σχεδιασμού x και y, παίρνουν εύρος τιμών στον πίνακα του EASY από 0 έως 6000. Ως συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση, τίθεται το ΑΕΠ, και όχι το CF που ήταν στα ορθογώνια χωράφια. Όσον αφορά τους περιορισμούς (constraints), αυτά είναι 3 διαφορετικά μεγέθη. Το πρώτο, όπως και στα ορθογώνια πάρκα, είναι η απόσταση μεταξύ των μηχανών, που επιβάλλεται να είναι άνω των 1.5 διαμέτρων, δηλαδή των 189m. Το δεύτερο, είναι ότι το εξωτερικό γινόμενο RGH, το οποίο ορίστηκε παραπάνω, για όλες τις ανεμογεννήτριες και για όλα τα εξωτερικά σημεία πρέπει οπωσδήποτε να είναι αρνητικό. Έτσι, αφού έχουν τεθεί στον πίνακα μεταβλητών σχεδιασμού του EASY τα

παραπάνω όρια 0-6000, ο EASY επιλέγει τιμές συντεταγμένων μέσα από αυτό το εύρος. Επειδή, ομως, το κυρτό χωράφι περιβάλλεται από το 6000 επί 6000, από το οποίο επιλέγει τιμές ο EASY, επιλέγει και τιμές για ζεύγη συντεταγμένων των μηχανών, που είναι εκτός ορίων του κυρτού χωραφιού και δίνουν θετικό RGH, για τις οποίες απειρίζει το ΑΕΠ, απορρίπτοντάς τες. Βέβαια, αν το RGH είναι αρνητικό, δεν είναι σίγουρο ότι θα γίνουν αποδεκτές, εκτός αν πληρούν και τον τρίτο περιορισμό. Ο τρίτος περιορισμός είναι ότι, επειδή το σημείο της ανεμογεννήτριας πρέπει να απέχει από τα όρια του χωραφιού τουλάχιστον μία ακτίνα, δεν αρκεί μόνο το RGH να είναι αρνητικό, αλλά πρέπει και η κάθετη (δηλαδή η ελάχιστη) απόσταση μεταξύ μίας ανεμογεννήτριας και κάθε μίας εκ των 15 ευθειών που ενώνουν τα εξωτερικά σημεία του πάρκου, να είναι άνω των 63m. Μόνο αν πληρούνται οι 3 παραπάνω περιορισμοί, μπορεί να γίνει δεκτό ένα ζεύγος συντεταγμένων x,y, για την τοποθέτηση μίας ανεμογεννήτριας.

Αυτές, λοιπόν, είναι οι ρυθμίσεις του EASY, έτσι ώστε να γίνει η βέλτιστη επιλογή συντεταγμένων σε αυτό το πάρκο, τηρώντας τους απαραίτητους περιορισμούς.

Παρακάτω, απεικονίζεται το αιολικό πάρκο τυχαίου πολυγωνικού σχήματος με τη βέλτιστη επιλογή συντεταγμένων, από τον EASY για 15 ανεμογεννήτριες με το ρόδο ανέμου Α, ούτως ώστε να μεγιστοποιηθεί το ΑΕΠ:



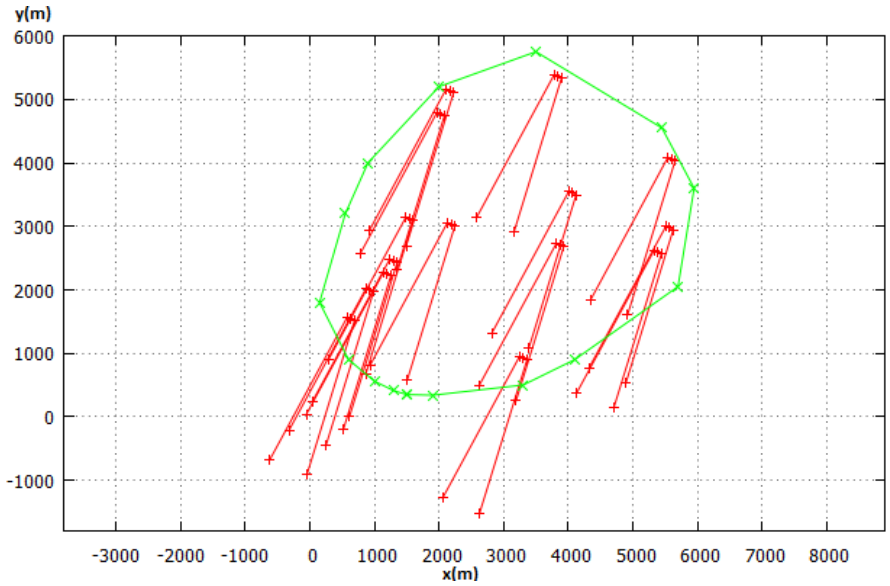
Σχ.3.α.83: Βελτιστοποιημένο πάρκο τυχαίου κυρτού πολυγωνικού σχήματος 15 ανεμογεννητριών με το ρόδο ανέμου Α.

Ακολουθεί ο πίνακας αρίθμησης μηχανών για το παραπάνω πάρκο:

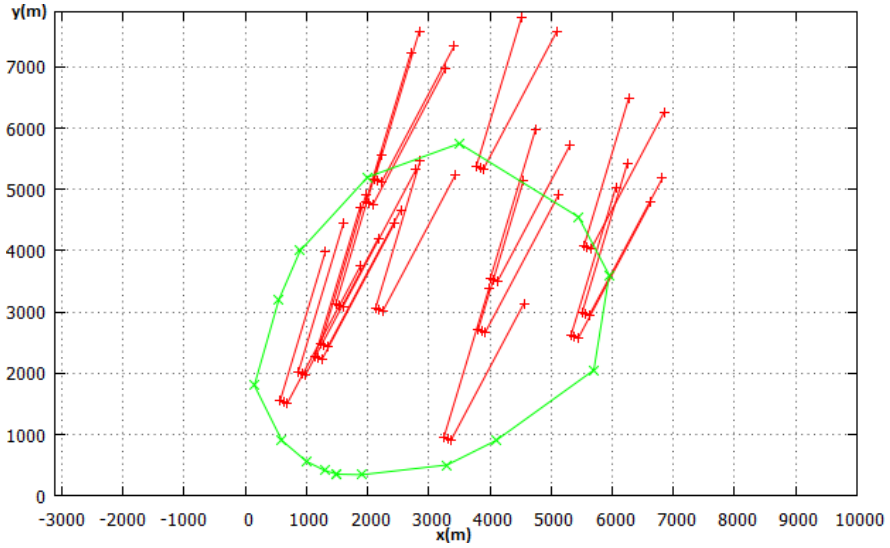
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	x(m)	y(m)
1	4065.362	3520.744
2	1197.260	2249.315
3	3306.262	928.767
4	2028.767	4773.973
5	5594.521	4047.554
6	3839.139	5361.840
7	633.072	1537.378
8	1542.466	3115.264
9	3871.233	2699.609
10	2186.693	3028.767
11	1293.542	2456.556
12	2170.450	5140.509
13	928.180	1996.086
14	5382.975	2588.454
15	5567.710	2971.233

Πίν.3.α.24: Συντεταγμένες x,y των μηχανών

Η βελτιστοποίηση έγινε με ρόδο ανέμου το Α, που έχει ασθενέστερο, από πλευράς συχνοτήτων ανέμου, ζευγάρι διευθύνσεων τις 22.5-202.5 μοίρες και ισχυρότερο το ζευγάρι διευθύνσεων τις 157.5-337.5 . Και σε αυτό το πάρκο, ήδη από το Σχ.3.α.83 είναι εμφανές ότι η τοποθέτηση έγινε με σκοπό οι μηχανές να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αλληλεπίδραση ομόρρου στο ζευγάρι διευθύνσεων 22.5-202.5, ενώ, φαίνεται ότι στο ζευγάρι 157.5-337.5 υπάρχει μηδενική αλληλεπίδραση ομόρρου. Χρήσιμο είναι να παρουσιαστούν οι απεικονήσεις ομόρρου στις διευθύνσεις 22.5 και 202.5 μοιρών και στην κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών:



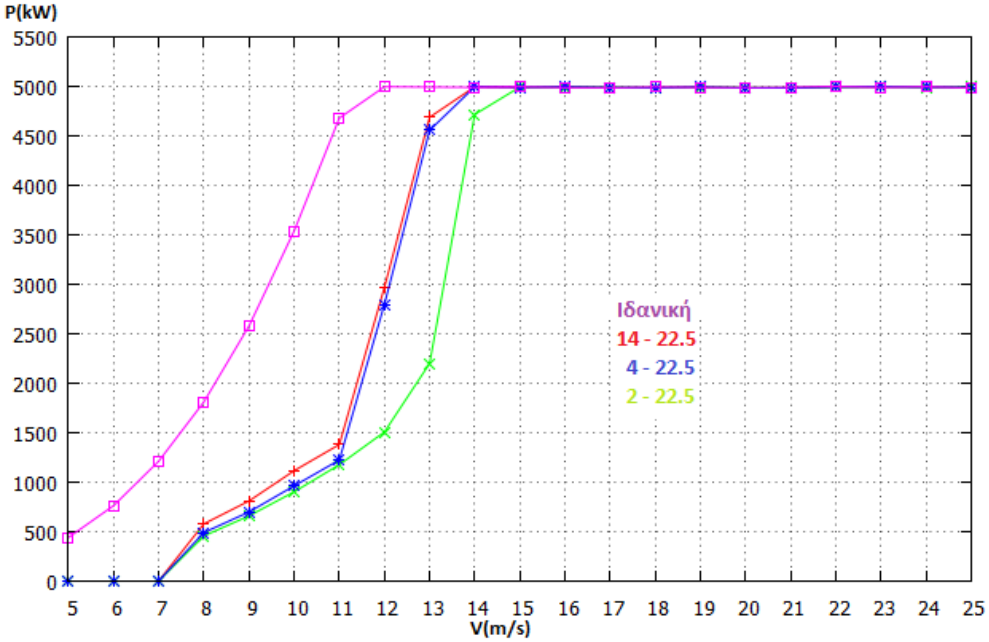
Σχ.3.α.84: Απεικόνιση ομόρρου στις 22.5°



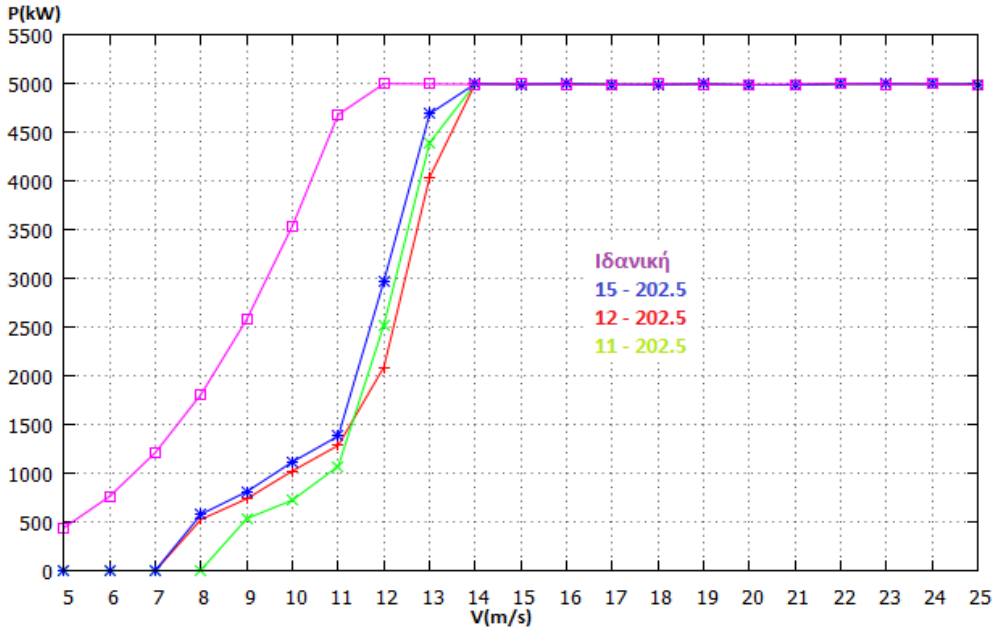
Σχ.3.α.85: Απεικόνιση ομόρρου στις 202.5°

Και στις δύο αυτές διευθύνσεις υπάρχει αρκετά έντονη αλληλεπίδραση ομόρρου μεταξύ των ανεμογεννητριών, με επίκεντρο τις 5 ανεμογεννήτριες 2, 7, 8,11 και 13, που βρίσκονται η μία πίσω από την άλλη, αλλά και τα ζευγάρια 4-12 και 14-15.

Για να υπάρχει μία σαφέστερη εικόνα του μεγέθους του ομόρρου που επιδρά στις μηχανές σε αυτές τις δύο διευθύνσεις, παρουσιάζονται παρακάτω οι καμπύλες ισχύος των 3 πιο φορτισμένων μηχανών, για κάθε μία από τις διευθύνσεις των 22.5 και 202.5 μοιρών, σε σχέση με την ιδανική καμπύλη ισχύος:



Σχ.3.α.86: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 2, 4 και 14 στις 22.5°

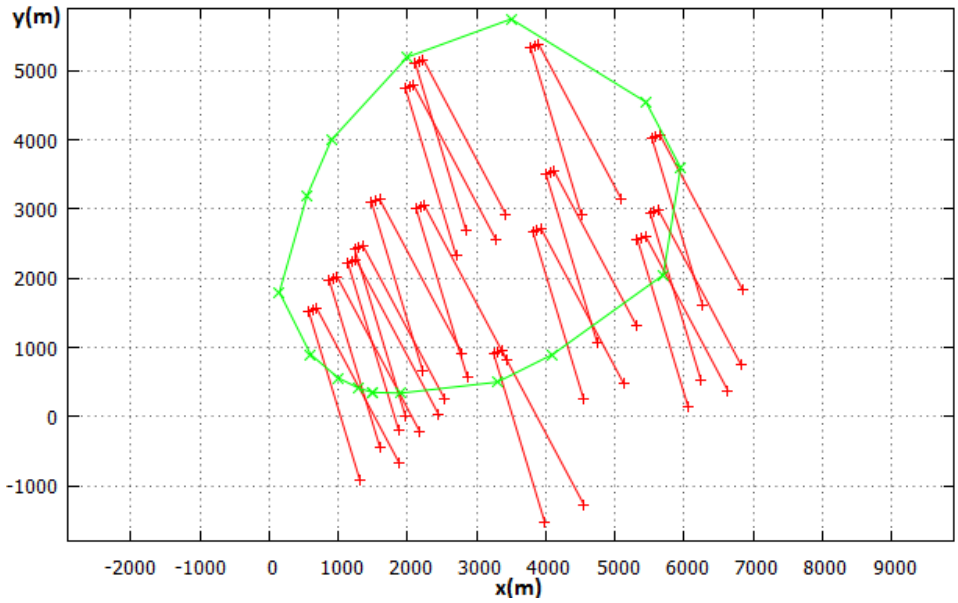


Σχ.3.α.87: Καμπύλες ισχύος των μηχανών 11, 12 και 15 στις 202.5°

Κατ' αρχήν, όσον αφορά τη διεύθυνση των 22.5 μοιρών, και οι μηχανές 12 και 14 δέχονται απλό ομόρρου από τις 4 και 14, αντίστοιχα, σε αντίθεση με τη μηχανή 2, που δέχεται διπλό ομόρρου από τις 8 και 11. Η μικρή διαφορά ισχύος, στις 4 και 14, οφείλεται στο γεγονός ότι η 4 είναι λίγο πιο κοντά στη 12 από ότι η 14 στη 15. Όσον αφορά τη μηχανή 2, είναι πάρα πολύ κοντά και συνευθειακά τοποθετημένη με την 11, επειδή δέχεται διπλό ομόρρου, σύμφωνα με

το μοντέλο αλληλεπίδρασης, για μικρές ταχύτητες ανέμου αποδίδει σχεδόν την ίδια ισχύ με τις άλλες δύο, ενώ αν δεχόταν μόνο τον ομόρρου της 11 θα ήταν πολύ πιο χαμηλά, αλλά θα απέδιδε καλύτερα σε μεγαλύτερες ταχύτητες, όπου, όμως, χάνει τεράστια ποσά ισχύος και, άρα, ενέργειας, λόγω του διπλού ομόρρου.

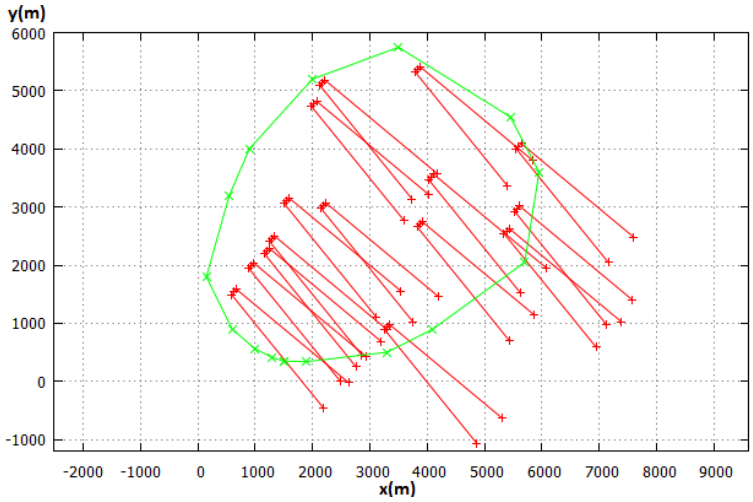
Όσον αφορά τη διεύθυνση των 202.5 μοιρών, οι μηχανές 15 και 11 δέχονται απλό ομόρρου, ενώ η 12 πολλαπλό. Η διαφορά των 15 και 11 σε αποόδοση οφείλεται στην πολύ μικρή απόσταση της 11 από 2, σε σχέση με την απόσταση της 15 από τη 14. Η 12 δεν διαφέρει, ουσιαστικά, σε απόδοση για χαμηλές ταχύτητες από τη 15, καθώς και η οι δύο είναι πολύ αποδοτικότερες από την 11, ωστόσο, λόγω μοντλελου αλληλεπίδρασης, αποδίδει λιγότερο από όλες για ταχύτητες ανέμου άνω των 11.3 m/s.



Σχ.3.α.88: Απεικόνιση ομόρρου στις 337.5°

Όπως ήταν εμφανές, ακόμα και από το Σχ.3.α.83, δεν υπάρχει επίδραση ομόρρου στις μηχανές στην κύρια διεύθυνση, αν εξαιρεθούν οι μηχανές 3 οποία δέχεται τον ομόρρου της μηχανής 10, με την απόστασή τους όμως να είναι μεγάλη (περίπου 2200m, δηλαδή 18 διάμετροι) και το χαμένο ποσό ενέργειας σχετικά μικρό, και 14 που δέχεται ομόρρου από την 6, με τη μεταξύ τους απόσταση να είναι, όμως, περίπου 25 διάμετροι (δεν φαίνεται στο σχήμα διότι ο απεικονήσεις ομόρρου των μηχανών φτάνουν έως 20 διαμέτρους από τη μηχανή). Είναι, φυσικά, ελάχιστο το έλλειμα ταχύτητας και των δύο μηχανών, αρκεί, όμως, για να χαθεί η παραγόμενη ισχύς των 442kW για ταχύτητα ανέμου 5m/s στο πάρκο.

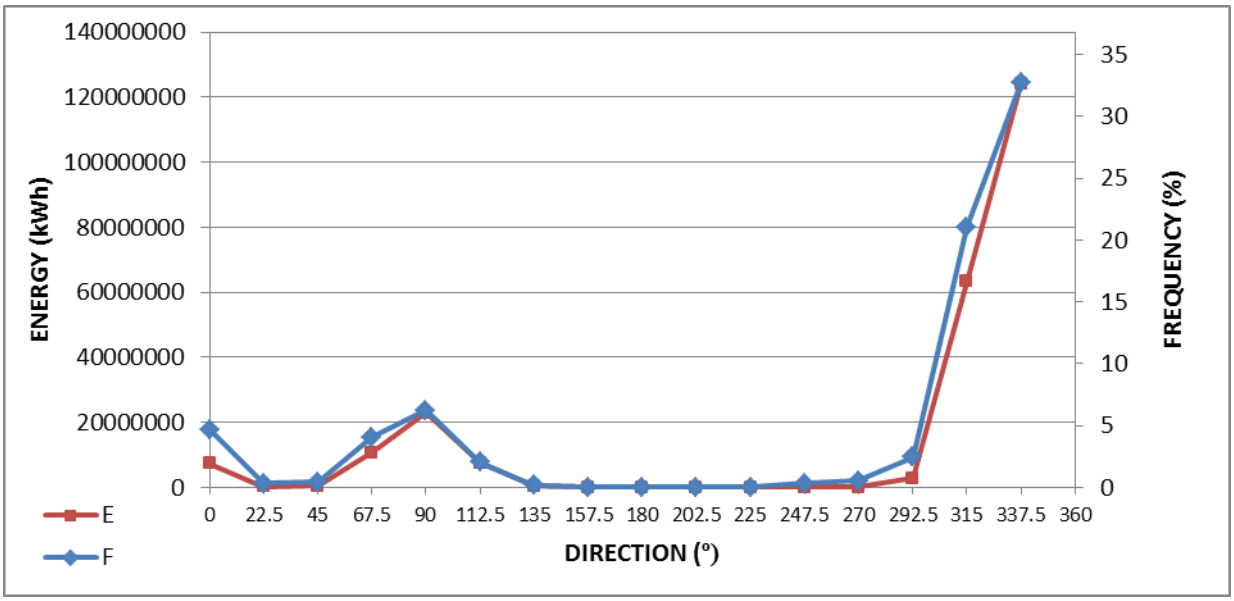
Ακολουθεί και η απεικόνηση ομόρρου για τη δεύτερη κυριότερη διεύθυνση των 315 μοιρών:



Σχ.3.α.89: Απεικόνιση ομόρρου στις 315°

Κι εδώ, όμοια και με την κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών, οι αλληλεπιδράσεις είναι σε μικρό πλήθος μηχανών και σε ελάχιστο βαθμό.

Παρακάτω, θα απεικονιστεί με το διάγραμμα ενέργειας, συχνότητας - διεύθυνσης, ποια διεύθυνση αποδίδει το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας, αλλά και ποια διεύθυνση αποδίδει το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας ανά συχνότητα, ποσό που δεν εξαρτάται από το άθροισμα των συχνοτήτων των διαφόρων ταχυτήτων σε κάθε διεύθυνση, αλλά από την κατανομή των συχνοτήτων στις διάφορες ταχύτητες ανέμου, αλλά και από το ποσοστό επίδρασης ομόρρου στις μηχανές, σε κάθε διεύθυνση.



Σχ.3.α.90: Καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων και παραγωγής ενέργειας για την κάθε διεύθυνση

Παρακάτω, ακολουθεί ο Πιν.3.α.25 με τις 3 διευθύνσεις που έχουν τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας, με πρώτη την κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών:

DIRECTION (°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)
337.5	32.69	124478148.3
315	21.028	63619931.4
90	4.059	22938261.4

Πιν.3.α.25: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.

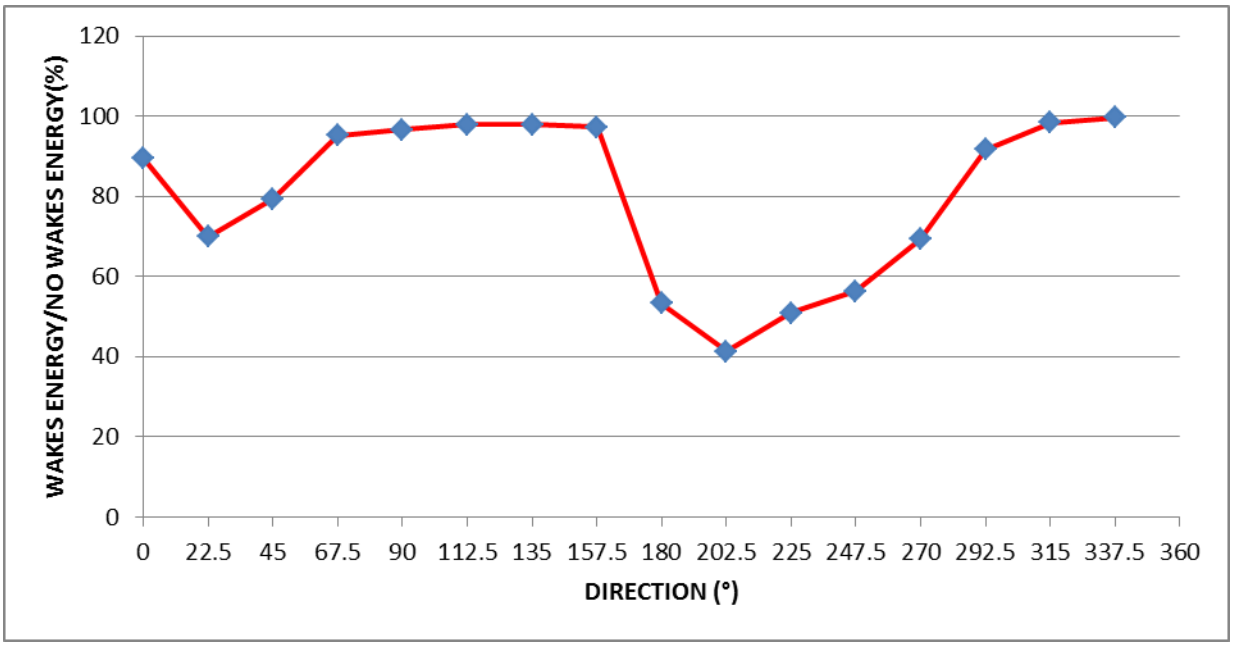
Παρακάτω, ακολουθεί ο Πιν3.α.26 με τις 3 διευθύνσεις που έχουν τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά συχνότητα (%), που, επίσης, πρώτη είναι η κύρια διεύθυνση των 337.5 μοιρών:

DIRECTION (°)	FREQUENCY (%)	ENERGY (kWh)/FREQUENCY (%)
337.5	32.69	3807540.48
112.5	2.017	3745036.179
90	6.248	3671296.639

Πιν.3.α.26: Οι 3 διευθύνσεις με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας.

Έτσι, λοιπόν, φαίνεται και εδώ πόσο σημαντική είναι η μέγιστη απόδοση ισχύος των μηχανών, και, κατ' επέκταση, η μέγιστη παραγωγή ενέργειας στις κύριες διευθύνσεις.

Ακολουθεί το διάγραμμα ποσοστών αποδιδόμενης ενέργειας προς την ενέργειας που αποδιδόταν χωρίς επίδραση ομόρρου:



Σχ.3.α.91: Ποσσστό % αποδιδόμενης ενέργειας σε κάθε διεύθυνση προς την ενέργεια που θα αποδοδίταν χωρίς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μηχανών

Και από το Σχ.3.α.91, εμφανέστατα οι μέγιστες απώλειες αθροιστικά στο ασθενέστερο ζευγάρι διευθύνσεων.

Το χωράφι αυτό και τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης των συντεταγμένων των μηχανών του, χρήσιμο είναι να συγκριθούν με το ορθογώνιο χωράφι διαστάσεων 3926m επί 2026m, με τις 15 ανεμογεννήτριες και το ίδιο ρόδο ανέμου Α που βελτιστοποίηθηκε στο υποκεφάλαιο 3.α.1. Αρχικά, το κυρτό πάρκο του παρόντος υποκεφαλαίου είναι πολύ μεγαλύτερο σε διαστάσεις από το ορθογώνιο χωράφι, καθώς, κοιτώντας τα Σχ.3.α.19 και Σχ.3.α.83, μπορεί να χωρέσει ολόκληρο μέσα στο κυρτό χωράφι. Άρα, περιμένει, κανείς, να έχει μεγαλύτερη τιμή CF και μεγαλύτερο ΑΕΠ. Το ΑΕΠ, δαλαδή το ετήσιο ποσό ενέργειας για όλες τις διευθύνσεις, όλες τις ταχύτητες ανέμου και τις 15 μηχανές ανέρχεται στις 241335905 kWh, ελάχιστα μεγαλύτερο από τις 239547456 kWh που παρήχθησαν στο ορθογώνιο χωράφι, και ως εκ τούτου, ελάχιστη διαφορά υπάρχει στα CF, με το CF του κυρτού να είναι $CF_{Γ}$ = 0.36733, ενώ το CF_{2A} = 0.36461 για το ορθογώνιο. Θα περίμενε, κανείς, δικαίως, μεγαλύτερη διαφορά. Ωστόσο, ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι ότι, επειδή και τα δύο CF αρκετά κοντά στο απόλυτο CF = 0.37441 για το ρόδο Α, απαιτείται χωράφι τεραστίων διαστάσεων, πολύ μεγαλύτερων του κυρτού πάρκου, ούτως ώστε για να ξεπεραστεί κατά πολύ το CF του ορθογωνίου πάρκου και να προσεγγίσει το απόλυτο, με 15 ανεμογεννήτριες, καθώς, οι αλληλεπιδράσεις ομόρρου είναι πολλές και έντονες με τέτοιο αριθμό μηχανών. Το σίγουρο είναι ότι το ΑΕΠ, και, ως εκ τούτου, το CF του μικρότερου, σε διαστάσεις, ορθογωνίου πάρκου θα έπρεπε να ξεπεραστεί, έστω και για λίγο, από το CF του, εμφανώς μεγαλυτέρου κυρτού πάρκου, όπως και έγινε.

3.β.1

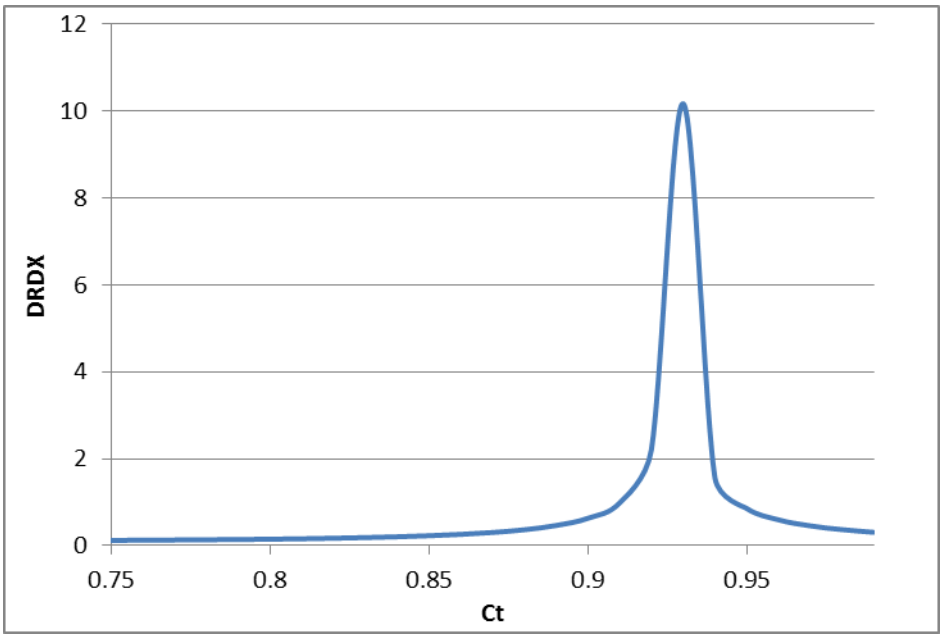
Στα δύο πρώτα υποκεφάλαια του 3ου κεφαλαίου, 3.α.1, 3.α.2, το αντικείμενο μελέτης ήταν η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε ιδανικές συντεταγμένες σε 3 ορθογώνια αιολικά πάρκα διαφορετικών μεγεθών, με 5, 15 και 40 ανεμογεννητριών, με δύο διαφορετικά ρόδα ανέμου A και B, συνολικά για όλες τις ανεμογεννήτριες, όλες τις ταχύτητες ανέμου στις οποίες λειτουργούν οι μηχανές και όλες τις διευθύνσεις του κάθε ρόδου, με σκοπό την παραγωγή μεγίστου CF και, κατ' επέκταση ΑΕΠ. Στο επόμενο υποκεφάλαιο 3.α.3, εξετάστηκε η μεγιστοποίηση του ΑΕΠ, αλλά σε χωράφι τυχαίου σχήματος, με 15 ανεμογεννήτριες, και ρόδο ανέμου το A. Το ζητούμενο, όπως έχει αναφερθεί, και για τα τρία υποκεφάλαια, ήταν η εύρεση των βέλτιστων x,y που θα τοποθετηθούν οι ανεμογεννήτριες και όχι η εύρεση των βέλτιστων χαρακτηριστικών λειτουργίας των μηχανών, καθότι, στον κώδικα, με απενεργοποιημένη την υπορουτίνα RAFT, η ισχύς και ο συντελεστής ώσης Ct των ανεμογεννητριών εξαρτώνταν αποκλειστικά από την ταχύτητα ανέμου που οι μηχανές δέχονταν, αφού δίνονταν, μέσω της καμπύλης POWER - Ct που «διάβαζε» ο κώδικας, και ήταν συγκεκριμένα και αμετάβλητα για κάθε ταχύτητα ανέμου. Στο παρόν υποκεφάλαιο, αντικείμενο μελέτης δεν είναι η τοποθέτηση των μηχανών, καθότι οι συντεταγμένες τους, πλέον, είναι συγκεκριμένα νούμερα, αλλά η επιλογή ιδανικής γωνίας βήματος και ω (ταχύτητα περιστροφής δρομέα), που θα γίνει από τον EASY, με σκοπό τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες. Σε αυτή την περίπτωση, λοιπόν, τα design variables του EASY είναι η γωνία βήματος pitch, που παίρνει τιμές από -5 έως 30 μοίρες, και το η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ω, με τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 1.267 rad/sec. Ως εκ τούτου, αφού οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι το βήμα και το ω, αυτά είναι, πλέον, οι μεταβλητές του κώδικα, και με βάση αυτά γίνεται ο υπολογισμός της ισχύος και του Ct των μηχανών. Επομένως, απαραίτητη προυπόθεση για τη λειτουργία του κώδικα και τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων, είναι η ενεργοποίηση της υπορουτίνας RAFT, ούτως ώστε, να γίνεται μέσα στη RAFT ο υπολογισμός της ισχύος και του Ct των μηχανών, με τη γωνία βήματος τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω και την ταχύτητα ανέμου που δέχεται η μηχανή. Η κύρια διαφορά με τα προηγούμενα υποκεφάλαια, είναι ότι το βήμα και το ω, δεν παίρνουν τιμές από την καμπύλη pitch – ω για την κάθε ταχύτητα ανέμου με την υπορουτίνα γραμμικής παρεμβολής, η οποία και απενεργοποιείται, αλλά δίνονται σε φάκελο στον κώδικα και μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή μέσα από το εύρος τιμών τους, για μία συγκεκριμένη ταχύτητα. Αυτές οι τιμές πρόκειται να επιλεγούν από τον EASY, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ΑΕΠ. Η διαδικασία αυτή, έγινε για ταχύτητα πάρκου 9m/s, για 4 ανεμογεννήτριες τοποθετημένες συνευθειακά και σε απόσταση 800m μεταξύ τους σε βόρεια διεύθυνση, δηλαδή με συντεταγμένες:

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	x(m)	y(m)
1	0.0	2400.0
2	0.0	1600.0
3	0.0	800.0
4	0.0	0.0

Πίν.3.β.1: Συνεταγμένες ανεμογεννητριών

Το δύσκολο σημείο σε αυτή τη διαδικασία, είναι η επιλογή κατάλληλων γωνιών βήματος και και ταχυτήτων περιστροφής ω, έτσι ώστε οι μηχανές να αποδίδουν αθροιστικά τη μέγιστη ισχύ. Δηλαδή, μπορεί με κάποιες γωνίες βήματος και ταχύτητες ω που μεγιστοποιούν την ισχύ μίας μηχανής, να πέφτει η απόδοση των υπολοίπων με αποτέλεσμα μία μη ικανοποιητική συνολική απόδοση. Εδώ θα αποδειχθεί πόσο σημαντικό ρόλο παίζει το Ct που θα υπολογίζεται για κάθε μηχανή. Αρχικά, να σημειωθεί ότι ο EASY έχει 8 μεταβλητές σχεδιασμού σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή ένα ζεύγος (βήματος, στροφών) για κάθε μία εκ των 4 μηχανών, με μέγεθος μεγιστοποίησης (cost function) το ΑΕΠ, δηλαδή μέγεθος ελαχιστοποίησης το –ΑΕΠ, αφού ο EASY ελαχιστοποιεί μεγέθη. Δεν υπάρχουν σε αυτό το υποκεφάλαιο περιορισμοί για τον EASY.

Στη διεξαγωγή της παραπάνω διαδικασίας, έγινε αντιληπτή και η ανακρίβεια του μοντέλου Abramovich, όσον αφορά την κλίση του ομόρρου. Σύμφωνα με το μοντέλο, λοιπόν, όσο το Ct αυξάνεται, αυξάνετει μεν το έλλειμμα, αλλά αυξάνεται και η κλίση του ομόρρου, με αποτέλεσμα να μειώνεται δραματικά το μέγεθος του δυναμικού πυρήνα. Ακόμα πιο σημαντικό, όμως, είναι το γεγονός ότι μειώνεται δραματικά το μήκος ανάκτησης ταχύτητας. Όταν, λοιπόν, ο EASY τέθηκε σε λειτουργία, επέλεξε βήμα και στροφές, τέτοια ώστε να αυξάνεται το Ct, σε τέτοιο βαθμό ώστε να μεγιστοποιεί την ακτίνα του ομόρρου, άρα να ελαχιστοποιεί το δυναμικό πυρήνα και να έχει πολύ γρήγορη ταχύτητα ανάκτησης στον ομόρρου. Με αυτόν, λοιπόν, τον τρόπο, επιτύγχανε να δέχεται η επόμενη μηχανή ταχύτητα πάρκου, και η απόδοση ισχύος εκτοξευόταν. Δε θα μπορούσε να γίνει αποδεκτό το αποτέλεσμα, διότι βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στην ανακρίβεια του μοντέλου να αυξάνεται η κλίση του ομόρρου με την αύξηση του Ct. Παρακάτω, παρατίθεται διάγραμμα που απεικονίζει τη μεταβολή της κλίσης του ομόρρου με το Ct, σύμφωνα με τους τύπους του μοντέλου Abramovich:



Σχ.3.β.1: Μεταβολή της κλίσης του ομόρρου με το Ct.

Προφανέστατα, ο EASY επέλεξε Ct = 0.925, που οδήγησε σε αποτελέσματα που αναλύθηκαν παραπάνω.

Για να διορθωθεί το παραπάνω λάθος, μία αρκετά αποτελεσματική λύση είναι να τεθεί ένα όριο στο Ct, έτσι ώστε, όμως, να οριοθετείται μόνο η κλίση του ομόρρου, καθώς και ο ρυθμός ανάκτησης ταχύτητας μέσα στον ομόρρου, που εξαρτάται από την ακτίνα του σε συγκεκριμένη απόσταση από την ανεμογεννήτρια, και να μην τίθεται όριο σε κανέναν άλλο υπολογισμό, όπου εμπεριέχεται το Ct. Για παράδειγμα, για την ορθότητα των υπολογισμών είναι πολύ σημαντικό να μην οριοθετείται το Ct στον υπολογισμό του ελλείμματος. Για το λόγο αυτό, και επειδή ο υπολογισμός της κλίσης του ομόρρου, άρα και της ακτίνας του γίνεται μέσα σε υπορουτίνα, τη WAKE SLOPE, μέσα στην υπορουτίνα τέθηκε όριο 0.88 στο Ct. Αυτό, φυσικά, σημαίνει ότι μπορεί να υπερβεί αυτή την τιμή, χωρίς, όμως, από αυτή την τιμή και άνω να υπάρχει μεταβολή στην κλίση του ομόρρου. Σημαντικό είναι, όμως, όσο αυξάνεται το Ct, να αυξάνεται και το έλλειμμα της ταχύτητας, ακόμα και για Ct>0.88, κάτι που επιτυγχάνεται καθώς ο υπολογισμός αυτός είναι, προφανώς, εκτός υπορουτίνας.

Στο, διορθωμένο, πλέον πρόγραμμα, με τη χρήση του EASY, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ω(rad/sec)	pitch(°)	V (m/s)	Ct
1	1.139	-0.975	9.00	0.880
2	1.035	-1.185	8.34	0.880
3	1.033	-1.230	8.35	0.881

4	1.017	-0.891	8.35	0.853

Πίν.3.β.2: Αποτελέσματα EASY Abramovich

Ο επόμενος πίνακας, περιέχει τα αντίστοιχα μεγέθη, εάν και οι 4 μηχανές λειτουργούσαν στο μέγιστο Cp:

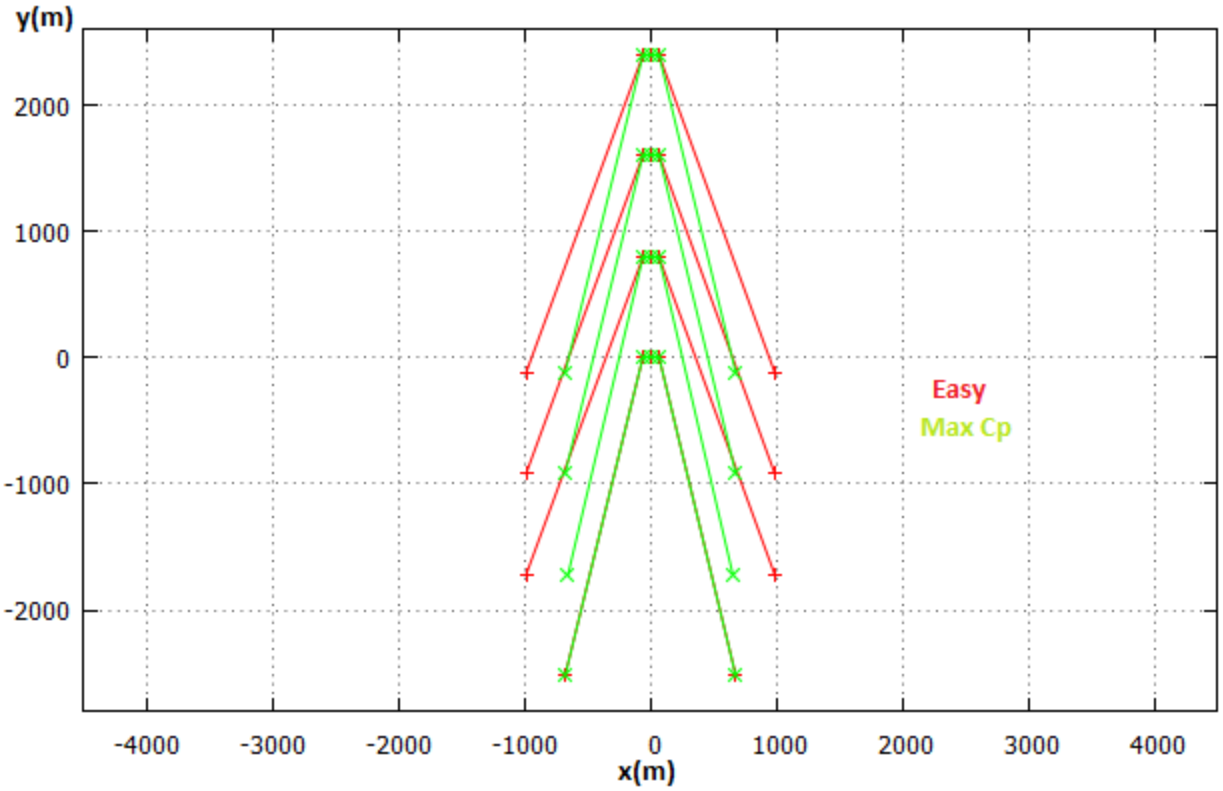
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ω(rad/sec)	pitch(º)	V(m/s)	Ct
1	1.096	-0.891	9.000	0.853
2	0.958	-0.891	7.870	0.853
3	0.961	-0.891	7.936	0.853
4	0.960	-0.891	7.883	0.853

Πίν.3.β.3: Αποτελέσματα Μέγιστο Cp Abramovich

Είναι λογικό να περιμένει κανείς ότι οι μηχανές θα λειτουργούν με ω και βήμα, τέτοιο ώστε να δουλεύουν με το λ που δίνει το μέγιστο Cp, που εξαρτάται από το ω ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου που δέχεται η μηχανή, και με το βήμα που δίνει το μέγιστο Cp από όλα τα Cp που δίνουν τα λ_{opt} στα διάφορα βήματα, άρα το μέγιστο των μεγίστων Cp. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν ισχύει, καθότι στις μηχανές 1,2 και 3, με αυτή τη ρύθμιση επάγουν ομόρρου με Ct = 0.853, και επομένως, ο ομόρρους αυτός έχει μεγαλύτερο δυναμικό πυρήνα, και να γίνεται πιο αργά η ανάκτηση της ταχύτητας του ανέμου, από ότι σε μεγαλύτερα Ct, μέχρι 0.88. Έτσι, λοιπόν, οι παραπάνω τιμές βήματος και ω που επέλεξε ο EASY, για τις ανεμογεννήτριες 1,2 και 3, βασίζονται στη λογική ότι οι ανεμογεννήτριες που ακολουθούν, δηλαδή οι 2, 3 και 4 αντίστοιχα, θα δέχονται άνεμο με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ταχύτητα, και όχι να παράγουν τη μέγιστη ισχύ με το μέγιστο Cp. Άλλωστε, αυτό είναι λογικό, καθώς μία μικρή αύξηση του Cp επιφέρει πολύ μικρότερη αύξηση στην ισχύ, από ότι μία αντίστοιχη αύξηση στην ταχύτητα ανέμου, καθώς η ταχύτητα ανέμου είναι υψωμένη σε τρίτη δύναμη. Για το λόγο αυτό, στις μηχανές 1,2 και3, ο EASY επέλεξε τέτοια ω και βήμα ώστε να έχουν ένα Ct αρκετά μεγάλο, και, άρα, να επάγουν ομόρρου με μεγάλη κλίση, μικρό δυναμικό πυρήνα και να γίνεται η ανάκτηση ταχύτητας του ανέμου σε μικρό μήκος. Έχει τεθεί ένα όριο βέβαια στο Ct, όσον αφορά μόνο τον υπολογισμό κλίσης ομόρρου, και κατ' επέκτασην, μήκους ανάκτησης ταχύτητας, αφού η ακτίνα του ομόρρου που, σύμφωνα με το μοντέλο Abramovich, υπάρχει στον τύπο του ελλείματος εκτός δυναμικού πυρήνα, εμπεριέχει τον υπολογισμό του DRDX. Πριν τεθεί αυτό το όριο, ο EASY είχε επιλέξει Ct=0.925, καθότι εκεί η κλίση ομόρρου ήταν μέγιστη και η ανάκτηση ταχύτητας αστραπιαία. Τώρα, λοιπόν, επέλεξε Ct=0.88 για τις 1,2 και 3, αφού εκεί πλέον υπάρχει μέγιστη κλίση ομόρρου. Θα μπορούσε να επιλέξει μεγαλύτερο Ct, η κλίση, όμως του ομόρρου δεν θα αυξανόταν άλλο, ενώ το μόνο που θα αυξανόταν, θα ήταν το έλλειμα, άρα, δεν συνέφερε μία τέτοια λύση.

Η μηχανή 4, όμως, της οποίας ο ομόρρους δεν επηρεάζει καμία μηχανή, επιβάλλεται να δουλέψει με το μέγιστο των μεγίστων Cp, για τη μέγιστη παραγωγή ενέργειάς της. Και πράγματι, ο EASY επέλεξε ω και βήμα, ώστε η 4 να δουλεύει με το βέλτιστο Cp.

Παρακάτω απεικονίζονται οι ομόρροι για τη λύση του EASY με κόκκινο και αυτή με τα μέγιστα Cp με πράσινο:



Σχ.3.β.2: Απεικόνιση ομόρρου των 4 μηχανών για EASY και μέγιστο Cp.

Από το Σχ.3.α.93, φαίνεται ότι στην ανεμογεννήτρια 4 η κλίση των ομόρρων είναι όμοια, καθώς και στις δύο περιπτώσεις η μηχανή δουλεύει στο μέγιστο Cp και παράγει όμοιο Ct.

Το συνολικό ετήσιο ποσό ενέργειας των 4 ανεμογεννητριών, ανέρχεται στις 76926 MWh. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να συγκριθεί το ποσό αυτό με την ετήσια ενέργεια που θα παραγόταν αν όλες οι μηχανές δούλευαν στο μέγιστο Cp. Με υπολογισμούς από τον κώδικα, το ποσό αυτό ανέρχεται σε 68632.8 MWh, αρκετά μικρότερο από το αυτό που παράχθηκε με τις γωνίες βήματος και ω της επιλογής του EASY. Επιπλέον, υπολογίστηκε και το αντίστοιχο ποσό μέσω της POWER-Ct που χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια, και είναι ακόμα μικρότερη, καθώς ανέρχεται στις 61548 MWh. Να αναφερθεί, ότι, πριν τεθεί το όριο στο Ct, το ποσό αυτό είχε φτάσει κοντά στις 90000 MWh, αποτέλεσμα που, όμως, οφείλεται σε ανακρίβεια του μοντεόλυ Abramovich.

Παρατίθεται πίνακας που αναγράφει την ισχύ που θα παρήγαγε η κάθε ανεμογεννήτρια αν λειτουργούσε με τα χαρακτηριστικά της καμπύλης POWER – Ct, σε σύγκριση με την ισχύ που παράγει με τη βέλτιστη γωνία βήματος και ταχύτητα ω που επέλεξε ο EASY για τη συγκεκριμένη διάταξη και ταχύτητα πάρκου 9m/s:

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	POWER – Ct (kW)	EASY ABRAMOVICH (kW)
1	2581.047	2584.693
2	1423.724	2058.980
3	1515.903	2069.141
4	1505.389	2068.688

Πίν.3.β.4: Σύγκριση ισχύος μηχανών με βήματα και ω του EASY Abramovich με την ισχύ από την καμπύλη λειτουργίας POWER-Ct.

Εδώ φαίνεται καλύτερα από οπουδήποτε πόσο σπουδαία είναι η ρύθμιση των βημάτων και ω στις 1,2 και 3, ούτως ώστε να δέχεται η αντίστοιχα επόμενη ανεμογεννήτρια ομόρρου με μεγάλο Ct (άρα μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου), καθώς η τεράστια διαφορά απόδοσης ισχύος στις δύο περιπτώσεις υπάρχει στις μηχανές 2, 3 και 4, που είναι αυτές που δέχονται ομόρρου. Και η πρώτη θα μπορούσε, με μέγιστο Cp να έχει μεγαλύτερη διαφορά, αλλά θα επηρέαζε αρνητικά τις επόμενες.

Βέβαια, η οριοθέτηση του Ct στην υπορουτίνα WAKE SLOPE η οποία είναι η υπορουτίνα υπολογισμού κλίσης του ομόρρου, ναι μεν διορθώνει επιτυχώς αυτή τη μη ρεαλιστική συμπεριφορά των μηχανών που εμφανίζεται στο μοντέλο Abramovich, ωστόσο, είναι μία αυθαίρετη κίνηση, που αν και φαίνεται να δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα, δεν μπορεί κανείς να πειστεί για την ορθότητάς τους. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητο να επαναληφθεί η διαδικασία βέλτιστων γωνιών βήματος και ω με το μοντέλο ομόρρου GCL, και να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στη χρήση του μοντέλου Abramovich για τη μεγιστοποίηση ενέργειας του πάρκου από τον EASY, με μεταβλητές σχεδιασμού το βήμα και το ω, ήταν σχετικό με τον τύπο που δίνει την κλίση του ομόρρου, και, κατ’ επέκτασην, το μήκος του δυναμικού πυρήνα και το ρυθμό ανάκτησης της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, έγιναν αλλαγές των τύπων του μοντέλου Abramovich από τους τύπους του GCL, όσον αφορά τον τύπο που υπολογίζει την ακτίνα του ομόρρου, την κλίση του ομόρρου, το έλλειμα ταχύτητας του ανέμου και ως εκ τούτου την ταχύτητα ανέμου μέσα σε κάθε σημείο του ομόρρου. Έτσι, με ακριβώς τις ίδιες ρυθμίσεις, ο EASY, έδωσε, αρχικά, βέλτιστες τιμές εξωπραγματικές για το βήμα και το ω, με αποτέλεσμα οι μηχανή 2 να έχει αρνητικό Ct, και, αντί να επιβραδύνει την ταχύτητα του ανέμου, να την επιταχύνει, έχοντας αρνητικό έλλειμα

και λειτουργώντας σαν jet. Επίσης, η 2, λόγω του αρνητικού Ct, απέδιδε αρνητικό ποσό ισχύος. Ο EASY, επειδή είναι πρόγραμμα βελτιστοποίησης και δεν εξετάζει με ποιο τρόπο βελτιστοποιεί μία συνάρτηση, αν δηλαδή είναι ρεαλιστικές οι επιλογές του, επιλέγει τιμές για το βήμα και το ω ώστε να μεγιστοποιήσει το ΑΕΠ με οποιονδήποτε τρόπο. Έτσι, δίνει τέτοιο βήμα και ω στην μηχανή 2, ώστε, ακόμα κι αν αυτή δίνει αρνητική ισχύ, με αρνητικό Ct αυτή θα επιταχύνει την ταχύτητα του ανέμου, και, σε συνδυασμό με το μοντέλο αλληλεπίδρασης, θα καταφέρει η μηχανή 4 να δέχεται αρνητική ταχύτητα ανέμου πολύ μεγάλης απόλυτης τιμής. Έτσι, με την κατάλληλη επιλογή βήματος και ω για την 4, της δίνει ένα ακόμα πιο αρνητικό Ct από αυτό που είχε η μηχανή 2, δηλαδή με μεγαλύτερη απόλυτη τιμή, ώστε, σε συνδυασμό με το ότι η 4 δέχεται μία αρνητική ταχύτητα μεγάλης απόλυτης τιμής, να έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θετικής ισχύος μεγαλύτερου μέτρου ακόμα και από την ονομαστική ισχύ. Αυτά είχαν ως αποτέλεσμα το ΑΕΠ να φτάσει τις 90000 MWh, ποσό άνω των φυσιολογικών ορίων. Βέβαια, ακόμα και αν το ΑΕΠ κυμαινόταν σε λογικά επίπεδα, θα ήταν απαράδεκτη η λύση καθώς βασίζεται σε μη αποδεκτά νούμερα άλλων μεγεθών.

Όπως είναι εύλογο, αναγκαίο είναι τα παραπάνω «σφάλματα» του μοντέλου GCL, να διορθωθούν. Επειδή κρίθηκε ότι για όλα τα εξωπραγματικά αποτελέσματα σε όλα τα μεγέθη, υπεύθυνο ήταν το αρνητικό Ct της μηχανής 2, τέθηκε στον κώδικα, και συγκεκριμένα μέσα στην υπορουτίνα RAFT, όπου γίνεται ο υπολογισμός του Ct, περιορισμός ώστε αυτό να μη γίνεται αρνητικό, δηλαδή όταν γίνεται αρνητικό, ο κώδικας να το μηδενίζει. Έτσι, ο EASY, πλέον, αναγκάζεται να καταλήξει σε φυσιολογικές τιμές βήματος και ω για τις ανεμογεννήτριες 1,2,3 και 4, που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ω(rad/sec)	pitch(°)	V(m/s)	Ct
1	1.054	0.411	9.000	0.762
2	0.969	0.205	8.199	0.778
3	0.960	-0.137	8.014	0.803
4	0.965	-0.822	7.895	0.851

Πίν.3.β.5: Αποτελέσματα EASY για GCL

Ακολουθεί πίνακας με τα αντίστοιχα μεγέθη όταν και οι 4 μηχανές λειτουργούν στο μέγιστο Cp:

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ω(rad/sec)	pitch(°)	V(m/s)	Ct
1	1.100	-0.822	9.000	0.851
2	0.993	-0.822	8.132	0.851
3	0.971	-0.822	7.951	0.851
4	0.958	-0.822	7.843	0.851

Πίν.3.β.6: Αποτελέσματα GCL με Μέγιστο Cp.

Στο μοντέλο Abramovich, ο EASY επέλεξε τέτοια γωνία βήματος και ω, ώστε να μην κερδίζει από την κάθε μηχανή τη μέγιστη ισχύ με λειτουργία στο μέγιστο Cp, αλλά με σκοπό η μηχανές 2,3 και 4 που δέχονται ομόρρου, να δέχονται άνεμο με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα, και μόνο η μηχανή 4 που είναι τελευταία στη σειρά λειτουργούσε στο μέγιστο Cp, και απέδιδε τη μέγιστη δυνατή ισχύ για την ταχύτητα ανέμου που δεχόταν. Ακριβώς την ίδια λογική ακολουθεί και με το μοντέλο GCL ο EASY, καθώς δε λειτουργούν οι μηχανές στο μέγιστο Cp, εκτός της τελευταίας στη σειρά, της μηχανής 4. Οι μηχανές 1,2 και 3 δεν λειτουργούν στο μέγιστο Cp, αλλά με τέτοιο βήμα και ω ώστε οι 2,3 και 4, αντίστοιχα, να δέχονται άνεμο με τη μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα. Βέβαια, οι διαφορές ταχύτητας ανέμου που δέχονται οι 2,3 και 4 με τις μηχανές να δουλεύουν στο μέγιστο Cp από ότι με το βήμα και το ω που έδωσε ο EASY, είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες διαφορές του μοντέλου Abramovich, όπως φαίνεται από τους πίνακες 3.β.2, 3.β.3, 3.β.5 και 3.β.6. Το τελευταίο, έχει ως αποτέλεσμα στο μοντέλο GCL, η διαφορά, του ΑΕΠ για τις τιμές βήματος και ω του EASY με το ΑΕΠ για τις τιμές των βήματος και ω που δίνουν μέγιστο Cp στις μηχανές, να είναι πολύ μικρή, και για την ακρίβεια, 571.9 MWh, καθώς το ΑΕΠ του EASY είναι 70627.3 MWh, ενώ το άλλο ανέρχεται στις 70055.4 MWh. Αντίθετα, στον Abramovich η διαφορά ήταν πολύ μεγαλύτερη, για την ακρίβεια, 8293.2 MWh.

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	POWER – Ct (kW)	EASY GCL (kW)
1	2581.047	2553.730
2	1423.724	1940.018
3	1515.903	1821.027
4	1505.389	1747.702

Πίν.3.β.7: Σύγκριση ισχύος μηχανών με βήματα και ω του EASY GCL με την ισχύ από την καμπύλη λειτουργίας POWER-Ct.

Η εικόνα για τις ισχύς είναι ακριβώς η ίδια με το Abramovich, αφού και εδώ η μεγάλη διαφορά απόδοσης ισχύος υπάρχει στις μηχανές που δέχονται ομόρρου 2, 3 και 4, οι οποίες και εδώ δέχονται μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου από ότι με τη χρήση της καμπύλης POWER – Ct.

Με αυτή τη ρύθμιση στο Ct, λοιπόν, ο EASY κατάφερε να καταλήξει σε λογικές τιμές βήματος και ω και σε λογικό αποτέλεσμα του μέγιστου ΑΕΠ. Η δοκιμή με το μοντέλο GCL, έγινε, ουσιαστικά, επειδή το μοντέλο Abramovich, χρειάστηκε παρέμβαση, για να καταλήξει σε αποτέλεσμα που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση του GCL δεν βοήθησε ιδιαίτερα την κατάσταση, διότι και αυτό χρειάστηκε παρέμβαση για να λειτουργήσει σωστά. Ωστόσο, το θετικό είναι ότι και με τα δύο πρότυπα ομόρρου, ο EASY έδωσε λύσεις που ξεπερνούν σε παραγωγή ΑΕΠ τη λύση με τις μηχανές να λειτουργούν στο μέγιστο Cp. Βέβαια, στην περίπτωση του Abramovich η διαφορά είναι, αν μη τι άλλο, υπερβολική, και η χρήση του GCL, συνέβαλε σε αυτό το συμπέρασμα, καθώς η διαφορά στο

GCL είναι πολύ πιο λογική, και ίσως έπρεπε να τεθεί ακόμα αυστηρότερο όριο στο Ct στο μοντέλο Abramovich για τον υπολογισμό της κλίσης του ομόρρου των μηχανών.

Παρ’ όλα αυτά, σίγουρα, σε αυτό το υποκεφάλαιο, αποδεικνύεται πόσο σημαντική είναι η επιλογή του βήματος και του ω για την απόδοση ενός αιολικού πάρκου, που, σε συνδυασμό με μία σωστή τοποθέτηση των μηχανών στο πάρκο, είναι δυνατόν να κερδιθούν σημαντικά μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες.

3.β.2

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκε η περίπτωση 4 ανεμογεννητριών τοποθετημένων συνευθειακά σε βόρεια διεύθυνση με μία ταχύτητα πάρκου, με απόσταση 800m η μία από την άλλη, όπου ζητούμενο ήταν η εύρεση βέλτιστου βήματος και ω από τον EASY, με στόχο τη μεγιστοποίηση του ΑΕΠ, χωρίς κανένα περιορισμό. Στη λειτουργία ενός πραγματικού πάρκου, η μέγιστη παραγωγή ενέργειας είναι, αναμφισβήτητα, αν όχι το σημαντικότερο, ένας εκ των σημαντικότερων κριτηρίων για την αξία του πάρκου. Ωστόσο, δεν πρέπει να ξεχνά κανείς ότι, οι ανεμογεννήτριες είναι πανάκριβα και πολύπλοκα μηχανήματα, που σημαίνει ότι η μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής τους είναι άλλος ένας πολύ σπουδαίος παράγοντας για ένα πάρκο. Για τη φθορά μίας ανεμογεννήτριας, σημαντικό ρόλο παίζει η κόπωση που αναπτύσσεται κατά τη λειτουργία της, οποία συνδέεται άμεσα με την τύρβη του ανέμου που αυτή δέχεται. Ως εκ τούτου, όσο μεγαλύτερη η τύρβη, τόσο μεγαλύτερη η κόπωση, άρα τόσο μικρότερος ο χρόνος ζωής των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, σκοπός είναι η εύρεση εκείνου του βήματος και ω, με τα οποία θα παράγεται ένα πολύ ικανοποιητικό ποσό ετήσιας ενέργειας, τα οποία θα έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της ελάχιστης δυνατής τύρβης στο πάρκο. Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι η $I = [(I_1{}^2 + I_2{}^2 + I_3{}^2 + I_4{}^2) / 4]^{0.5}$, όπου I η συνολική τύρβη και I_1, I_2, I_3 και I_4 η τύρβη των μηχανών 1,2,3 και 4, αντίστοιχα, δηλαδή, ουσιαστικά, ο μέσος όρος των τυρβών των μηχανών του πάρκου, οι οποίες, φυσικά, έχουν μονάδες ταχύτητας και δεν είναι ποσοστά..

Απαιτείται η παραγωγή ενέργειας να παραμείνει σε ικανοποιητικά όρια και να μην ελαττωθεί πέρα από κάποιο ποσοστό της βέλτιστης παραγωγής ενέργειας των 76926 MWh, με αποτέλεσμα το κατώτατό της όριο να ανέρχεται στις 65868 MWh ετησίως. Οι ρυθμίσεις στον κώδικα είναι ακριβώς οι ίδιες με το προηγούμενο υποκεφάλαιο. Στη ρύθμιση του EASY, όμως, ώστε το ΑΕΠ να μην «πέσει» κάτω από το όριο των 65868 MWh ετησίως, αλλά με ελάχιστοποίηση τύρβης, υπάρχουν μεταβολές. Οι μεταβλητές σχεδιασμού (design variables), είναι και εδώ το βήμα και το ω. Ωστόσο, πλέον, το cost function, δηλαδή η συνάρτηση που εξαρτάται από τα design variables και πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί, δεν είναι πλέον το ΑΕΠ, αλλά η ο μέσος όρος τύρβης των μηχανών στο πάρκο. Επειδή, όμως, το ΑΕΠ απαγορεύεται να φτάσει σε τιμές χαμηλότερες του προαναφερθέντος ποσού, τίθεται ως περιορισμός στον EASY το –ΑΕΠ να μην ξεπεράσει σε αλγεβρική τιμή τις -65868 MWh, άρα το ΑΕΠ να μην πέσει κάτω από τις 65868 MWh, αφού, όπως έχει αναφερθεί επανειλημένα, ο EASY δεν επιτρέπει στα μεγέθη που απαιτείται περιορισμός να ξεπεράσουν μία τιμή, και όχι να «πέσουν» χαμηλότερα από αυτήν. Από το μοντέλο τύρβης GCL που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2, αν μία μηχανή δεν δέχεται ομόρρου, επιδρά στα πτερύγιά της μόνο η ατμοσφαιρική τύρβη, που σε αυτήν την περίπτωση, μόνο για την πρώτη μηχανή, ισχύει $I = I_\alpha$=0.45 m/s. Για τις μηχανές 2,3 και 4, όμως,

που δέχονται ομόρρου, η συνολική τύρβη εξαρτάται και από την τύρβη λόγω ομόρρου, στην οποία, το μόνο μεταβλητό μέγεθος είναι το Ct της μηχανής που επάγει τον ομόρρου, δηλαδή το Ct της 1 για 2, της 2 για την 3, της 3 για την 4. Βάσει του μοντέλου, όσο το Ct της μηχανής που επάγει αυξάνεται, τόσο αυξάνεται η τύρβη της μηχανής που δέχεται τον ομόρρου αυτής που επάγει. Να τονιστεί, βέβαια, ότι η συνολική τύρβη για τις μηχανές 2,3 και 4 εξαρτάται και από την ταχύτητα ανέμου που αυτές δέχονται, άρα ο καλύτερος συνδυασμός είναι μικρό Ct με μικρή ταχύτητα ανέμου, και αυτό είναι θετικό, διότι, με μείωση του Ct της μηαχής που επάγει, μειώνεται και η ταχύτητα της μηχανής που δέχεται.

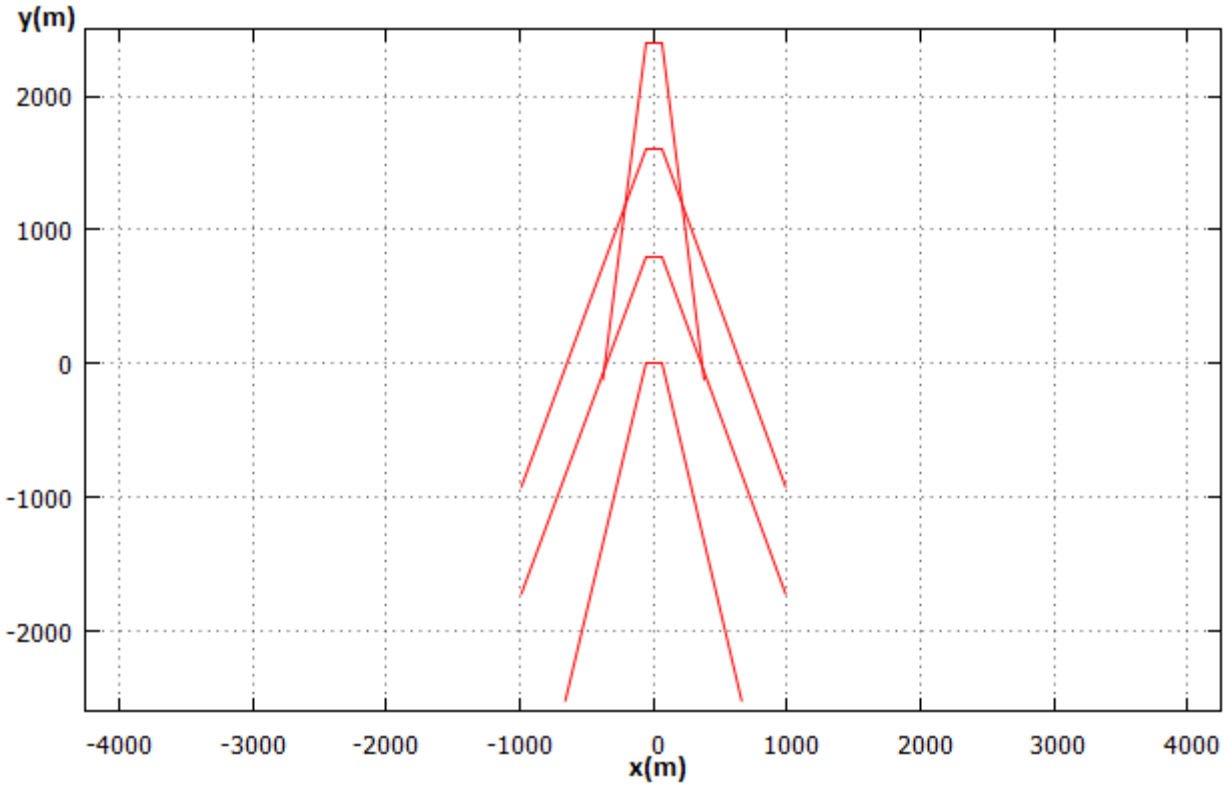
Ο EASY, τελικά, για την περίπτωση αυτή, επέλεξε τις εξής τιμές βήματος και ω για τις μηχανές 1,2,3 και 4, με την ταχύτητα που δέχεται η κάθε μηχανή, για αυτή τη γωνία βήματος και το ω, και το αντίστοιχο Ct :

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ω (rad/sec)	pitch (°)	V (m/s)	Ct
1	1.024	0.232	9.000	0.758
2	0.867	-1.159	6.972	0.881
3	1.001	-1.050	7.971	0.880
4	1.001	-0.891	8.220	0.853

Πίν.3.β.8: Αποτελέσματα EASY

Όπως είναι εμφανές, η καλύτερη λύση για ελαχιστοποίηση της τύρβης θα ήταν η επιλογή τέτοιου βήματος και ω ώστε οι μηχανές 2 και 3 να έχουν το Ct της πρώτης. Ωστόσο, ο περιορισμός για την παραγωγή ενέργειας, δεν επιτρέπει αυτή την επιλογή, καθώς με μικρά Ct θα ήταν μικρές οι ταχύτητες που οι επόμενες μηχανές δέχονται, κάτι το οποιό θα μείωνε πολύ την παραγωγή ενέργειας, που απαιτείται να παραμείνει σε υψηλά επίπεδα. Έτσι, λοιπόν, ο EASY επέλεξε τέτοιο βήμα και ω για την 1, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η τύρβη που δέχεται η μηχανή 2. Η τύρβη της 1 είναι η ατμοσφαιρική και δεν επηρεάζεται από κανένα παράγοντα, η παραγωγή ενέργειάς της με αυτό το βήμα και το ω, όμως, είναι μακριά από τη βέλτιστη, η οποία θα έδινε το Ct της περίπου στο 0.853. Για το λόγο αυτό, όμως, επέλεξε τέτοιο βήμα και ω για τις 2 και 3, ώστε να έχουν μεγάλο Ct για να επάγουν στις 3 και 4 μεγάλη ταχύτητα ανέμου και, έτσι, να εξισσορροπήθεί η απώλεια ενέργειας στην 1 και 2. Τέλος, η 4 φαίνεται να δουλεύει, με το μέγιστο των μεγίστων Cp, καθώς η λειτουργία της δεν επηρεάζει καμία μηχανή, αφού είναι η τελευταία στη σειρά, και έτσι, αφού η λειτουργία της δεν επιδρά στη συνολική τύρβη του πάρκου, στοχεύει στην μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειάς της, για την ταχύτητα ανέμου που δέχεται, χωρίς κανένα περιορισμό.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απεικόνηση του ομόρρου των 4 μηχανών, με τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις χαρακτηριστικών λειτουργίας, όπου φαίνεται η επίδραση στων ομόρρου των διαφορετικών Ct των μηχανών:



Σχ.3.β.3: Απεικόνιση ομόρρου των 4 ανεμογεννητριών με τα βήματα και ω του EASY.

Με αυτό το βήμα και ω που επέλεξε ο EASY για τις 4 μηχανές, εφόσον σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της τύρβης με κατώτατο όριο παραγωγής ενέργειας 65868 MWh, το αποτέλεσμα παραγωγής ενέργειας του πάρκου είναι το νούμερο αυτό, καθώς ο EASY εξάντλησε όλα τα περιθώρια, ούτως ώστε να ελαχιστοποιήσει τον μέσο όρο ταχύτητας τύρβης, η οποία και κατέληξε στο τελικό νούμερο I_{min} = 0.88908 m/s, όπου $I = [(I_1{}^2 + I_2{}^2 + I_3{}^2 + I_4{}^2) / 4]^{0.5}$.

Για να δοθεί ένα μέτρο σύγκρισης, αν οι 4 ανεμογεννήτριες λειτουργούσαν με βάση την καμπύλη POWER – Ct που χρησιμοποιήθηκε στα υποκεφαλαια 3.α.1, 3.α.2 και 3.α.3, και , φυσικά, με την ίδια διάταξη στο χώρο, θα απέδιδαν ετήσια ενέργεια 61548 MWh, με τύρβη 0.91876 m/s. Δηλαδή, με κατάλληλη ρύθμιση του βήματος και του ω, παράγονται ετησίως περίπου $4.5 \cdot 10^6$ kWh περισσότερες από ότι με τις τιμές της POWER – Ct, με ταυτόχρονη μείωση στη συνολική παραγωγή τύρβης στο πάρκο και, επομένως, μικρότερη καταπόνηση των μηχανών.

Λέξεις Κλειδιά (Key words)

- Αιολική ενέργεια
- Αιολικό πάρκο
- Ανεμογεννήτριες
- Βελτιστοποίηση
- Χωροθέτηση
- Χαρακτηριστικά λειτουργίας
- Ταχύτητα ανέμου

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Γ. ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ**: *ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ (ΕΚΔΟΣΗ 2005)*

2. **GOOGLE:** *ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)*